



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ**



**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ
ΠΡΟΓΝΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΠΟ ΤΟΝ ΤΥΠΟ ΚΑΙΡΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ
ΤΗΣ ΒΟΡΕΙΟΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ
ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΟΥ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΧΑΣΚΟΣ

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2025



**UNIVERSITY OF IOANNINA
SCHOOL OF SCIENCES
DEPARTMENT OF PHYSICS
METEOROLOGY LABORATORY**



**STUDY OF THE DEPENDENCE OF THE PREDICTABILITY OF
METEOROLOGICAL PARAMETERS ON WEATHER TYPES FOR
THE REGION OF NORTHWESTERN GREECE AND
INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF ITS
IMPROVEMENT**

PhD THESIS

DIMITRIOS CHASKOS

IOANNINA 2025

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

- **Αναπληρωτής Καθηγητής Χρήστος Λώλης (Επιβλέπων)**

Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

- **Ομότιμος Καθηγητής Αριστείδης Μπαρτζώκας**

Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

- **Διευθύντρια Ερευνών Δρ. Βασιλική Κοτρώνη**

Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

- **Αναπληρωτής Καθηγητής Χρήστος Λώλης**

Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

- **Ομότιμος Καθηγητής Αριστείδης Μπαρτζώκας**

Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

- **Διευθύντρια Ερευνών Δρ. Βασιλική Κοτρώνη**

Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών

- **Καθηγητής Νικόλαος Χατζηαναστασίου**

Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

- **Αναπληρωτής Καθηγητής Σπυρίδων Πατσουράκος**

Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

- **Επίκουρος Καθηγητής Νικόλαος Μπάκας**

Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

- **Επίκουρη Καθηγήτρια Αγγελική Φωτιάδη**

Τμήμα Αειφορικής Γεωργίας, Πανεπιστήμιο Πατρών

δὶς ἐς τὸν αὐτὸν ποταμὸν οὐκ ἂν ἐμβαίης

— *Ἡράκλειτος (6ος-5ος αι. π.Χ.)*

Στους γονείς μου

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή με τίτλο «Μελέτη της εξάρτησης του βαθμού προγνωσιμότητας των μετεωρολογικών παραμέτρων από τον τύπο καιρού για την περιοχή της βορειοδυτικής Ελλάδας και διερεύνηση της δυνατότητας βελτίωσής του», εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Μετεωρολογίας του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων κατά τη χρονική περίοδο 2018-2024, με χρήση της συστοιχίας ηλεκτρονικών υπολογιστών του Εργαστηρίου.

Από τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής προέκυψαν οι ακόλουθες επιστημονικές εργασίες:

- Chaskos DC, Lolis CJ, Kotroni V, Bartzokas A (2021) *A weather type classification for northwestern Greece*. 15th International Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics COMECAP 2021 (Ioannina, 26-29 September 2021) 644-648.

- Chaskos DC, Lolis CJ, Kotroni V, Bartzokas A (2023) *On the dependence of WRF model air temperature and precipitation forecast skill on the weather type for northwestern Greece*. 16th International Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics COMECAP 2023 (Athens, 25-29 September 2023). Environmental Science Proceedings 26(1): 165.

- Chaskos DC, Lolis CJ, Kotroni V, Hatzianastassiou N, Bartzokas A (2024) *Impact of Weather Types on Weather Research and Forecasting Model Skill for Temperature and Precipitation Forecasting in Northwest Greece*. Atmosphere 15(12): 1516.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντά μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Χρήστο Λώλη, ο οποίος υπήρξε πηγή καθοδήγησης, έμπνευσης και υποστήριξης καθ' όλη τη διάρκεια της διδακτορικής μου διατριβής. Η επιστημονική του καθοδήγηση συνέβαλε καθοριστικά στην εξέλιξη του ερευνητικού μου έργου, καθώς με ενθάρρυνε να εξερευνήσω νέες ιδέες και να αντιμετωπίσω τις προκλήσεις με επιμονή και κριτική σκέψη. Η πολύτιμη εμπειρία του, η αδιάκοπη ενθάρρυνση και η διαρκής υποστήριξή του αποτέλεσαν θεμέλια όχι μόνο για την ολοκλήρωση του παρόντος έργου, αλλά και για τη μελλοντική μου εξέλιξη ως επιστήμονα. Του οφείλω ειλικρινείς ευχαριστίες για την εμπιστοσύνη και την αφοσίωσή του.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τα υπόλοιπα μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής για την άψογη συνεργασία: στον Ομότιμο Καθηγητή κ. Αριστείδη Μπαρτζώκα για τις πολύτιμες παρατηρήσεις και συμβουλές που προσέφερε κατά την εκπόνηση της διατριβής μου και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και στη Διευθύντρια Ερευνών Δρ. Βασιλική Κοτρώνη για την εποικοδομητική κριτική και τις ανεκτίμητες παρατηρήσεις της. Όλα τα σχόλια και οι προτάσεις που έλαβα από την επιτροπή αποτέλεσαν ένα πολύτιμο εφόδιο για τη βελτίωση της έρευνάς μου και μου άνοιξαν νέες οπτικές στην προσέγγιση των ερευνητικών ερωτημάτων.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω θερμά τα υπόλοιπα μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής για την τιμή που μου έκαναν να αξιολογήσουν τη διδακτορική μου διατριβή και για τις εύστοχες παρατηρήσεις και προτάσεις τους, οι οποίες συνέβαλαν ουσιαστικά στη βελτίωση του έργου μου. Ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη οφείλω στον Καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαναστασίου για τη συμβολή του με εποικοδομητικά σχόλια, καθώς και για το ιδιαίτερο ενδιαφέρον που έδειξε σε όλη την πορεία της διατριβής μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συνεργάτες μου, για την απεριόριστη πίστη που έδειξαν στις δυνατότητές μου, σε όλη αυτή την πορεία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς και τα αδέρφια μου για την υπομονή και την κατανόηση που έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής. Με στήριξαν ώστε να παραμείνω προσηλωμένος στους στόχους μου, ακόμα και στις στιγμές που οι προκλήσεις φαίνονταν ανυπέρβλητες.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Abstract	3
Πίνακας συντμήσεων και ακρωνυμίων	4
Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή	5
1.1 Γενικά για την περιοχή της ΒΔ Ελλάδας.....	5
1.2 Τύποι καιρού	6
1.3 Πρόγνωση καιρού στη ΒΔ Ελλάδα – Τεχνολογίες και μέθοδοι.....	7
1.4 Τεχνικές επικύρωσης και επαλήθευσης ενός μετεωρολογικού μοντέλου	10
1.5 Στόχος και δομή διδακτορικής διατριβής.....	12
Κεφάλαιο 2 – Δεδομένα και Μεθοδολογία	14
2.1 Μετεωρολογικά δεδομένα.....	14
2.1.1 Δεδομένα ERA5 Reanalysis	14
2.1.2 Δεδομένα μοντέλου GFS.....	16
2.1.3 Δεδομένα μετεωρολογικών σταθμών Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών.....	17
2.2 Μεθοδολογία	19
2.2.1 Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (PCA)	19
2.2.2 Ανάλυση κατά Συστάδες (CA).....	21
2.2.3 Μεθοδολογία για τον ορισμό τύπων καιρού	23
2.2.4 Μοντέλο Έρευνας και Πρόγνωσης Καιρού WRF	24
2.2.4.1 Το Σύστημα Προ-επεξεργασίας του WRF (WPS).....	26
2.2.4.2 Το μοντέλο WRF με δυναμικό επιλυτή ARW.....	29
2.2.4.3 Φυσικές παραμετροποιήσεις του μοντέλου WRF	33
2.2.5 Μέθοδος σύγκρισης προγνωστικών – παρατηρούμενων τιμών θερμοκρασίας.....	36
2.2.6 Μέθοδος σύγκρισης προγνωστικών – παρατηρούμενων τιμών ύψους υετού	37
Κεφάλαιο 3 – Αποτελέσματα	41
3.1 Ταξινόμηση τύπων καιρού για την περιοχή της ΒΔ Ελλάδας.....	41
3.2 Αξιολόγηση προγνωστικών τιμών θερμοκρασίας.....	55
3.3 Αξιολόγηση προγνωστικών τιμών υετού	64
3.4 Αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας για διάφορες φυσικές παραμετροποιήσεις	73
3.5 Αποτελέσματα πρόγνωσης υετού για διάφορες φυσικές παραμετροποιήσεις.....	94
Κεφάλαιο 4 – Συμπεράσματα	104
Βιβλιογραφία	109
Παράρτημα Α	120
Παράρτημα Β	164
Παράρτημα Γ	184

Περίληψη

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελεί μια μελέτη της εξάρτησης του βαθμού προγνωσιμότητας των βασικών μετεωρολογικών παραμέτρων και συγκεκριμένα της θερμοκρασίας και του υετού, από τον τύπο καιρού για την περιοχή της βορειοδυτικής Ελλάδας. Επιπλέον, τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν για περαιτέρω έρευνα που σκοπό είχε τη διερεύνηση της βελτίωσης του προγνωστικού μοντέλου που εφαρμόστηκε.

Έχει παρατηρηθεί ότι για την περιοχή της βορειοδυτικής Ελλάδας, η προγνωστική ικανότητα ενός μετεωρολογικού μοντέλου που εφαρμόζεται σε αυτήν, διαφέρει ανάλογα τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν. Ο τρόπος με τον οποίο εξαρτάται η προγνωστική ικανότητα ενός μετεωρολογικού μοντέλου από τον τύπο καιρού δεν είναι σαφής, ιδιαίτερα σε περιοχές πολύπλοκου ανάγλυφου, όπως αυτού της βορειοδυτικής Ελλάδας. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα διδακτορική διατριβή επιχειρείται να δοθεί απάντηση στο πρόβλημα που αναφέρεται.

Για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής, αρχικά προσδιορίζονται οι τύποι καιρού (WTs) που επικρατούν στην περιοχή της βορειοδυτικής Ελλάδας, για μια χρονική περίοδο, στην οποία θα εφαρμοστεί ένα μετεωρολογικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού. Για τον προσδιορισμό των WTs, εφαρμόζονται συνδυαστικά οι στατιστικές μέθοδοι α) Παραγοντική Ανάλυση, η οποία αποτελεί μια παραλλαγή της Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών, και β) Ανάλυση κατά Συστάδες, χρησιμοποιώντας μετεωρολογικά δεδομένα για την ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος από τη βάση ERA5 Reanalysis. Αρχικά, με την εφαρμογή της Παραγοντικής Ανάλυσης γίνεται μια μείωση του μεγάλου πλήθους των αρχικών μετεωρολογικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται έτσι ώστε να προκύψει ένα μικρότερος αριθμός ασυσχέτιστων παραγόντων. Στη συνέχεια, στους παράγοντες που προκύπτουν από την προηγούμενη ανάλυση, εφαρμόζεται η Ανάλυση κατά Συστάδες που έχει ως αποτέλεσμα τον προσδιορισμό των τελικών WTs.

Το μετεωρολογικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της προγνωστικής του ικανότητας είναι το Μοντέλο Έρευνας και Πρόγνωσης Καιρού (WRF) και συγκεκριμένα η έκδοση 4.1.5. Η αρχικοποίηση του WRF γίνεται με τη χρήση των δεδομένων πρόγνωσης του Παγκόσμιου Συστήματος Πρόγνωσης (GFS), ενώ η εκτέλεση του πραγματοποιείται σε τρεις περιοχές προσομοίωσης χρησιμοποιώντας την τεχνική της μονόδρομης εμφώλευσης, με την περιοχή της βορειοδυτικής Ελλάδας να αποτελεί την τελική περιοχή με την υψηλότερη οριζόντια χωρική ανάλυση (2 km). Η εκτέλεση του WRF πραγματοποιείται για τις πλησιέστερες ημέρες στο κέντρο κάθε συστάδας σε κάθε WT. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 και 12 UTC και ημερήσιου υετού συγκρίνονται με τα δεδομένα μετεωρολογικών σταθμών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Για τη σύγκριση των τιμών θερμοκρασίας εφαρμόζεται η μέθοδος Cressman (χρήση τεσσάρων πλησιέστερων πλεγματικών σημείων στον σταθμό) και υπολογίζονται στατιστικά σφαλμάτων για κάθε σταθμό, ενώ για τη σύγκριση των τιμών υετού εφαρμόζεται μια μεθοδολογία που λαμβάνει υπόψη τον υετό στα εννέα πλησιέστερα πλεγματικά σημεία στον σταθμό και υπολογίζονται στατιστικές συναρτήσεις σφαλμάτων και επίδοσης.

Από την εφαρμογή των αναφερόμενων μεθόδων προσδιορίζονται δέκα WTs για την περιοχή της βορειοδυτικής Ελλάδας. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι το μοντέλο υπερεκτιμά σημαντικά τη θερμοκρασία αέρα στα 2 μέτρα στις 04 UTC για συγκεκριμένους WTs που χαρακτηρίζονται από αντικυκλωνική κυκλοφορία και για συγκεκριμένους σταθμούς της ενδοχώρας. Επίσης από τα αποτελέσματα των στατιστικών συναρτήσεων σφαλμάτων και επίδοσης για τον ημερήσιο υετό, προκύπτουν παρατηρούμενες διαφορές μεταξύ των WTs. Από τη μελέτη βελτίωσης των

αποτελεσμάτων πρόγνωσης της θερμοκρασίας, προκύπτει ότι με την κατάλληλη τροποποίηση συγκεκριμένων φυσικών παραμετροποιήσεων υπάρχει σημαντική βελτίωση της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου για τους WTs και τους σταθμούς που εμφανίζουν μεγάλα σφάλματα. Επίσης, προκύπτουν οι βέλτιστες φυσικές παραμετροποιήσεις μικροφυσικής και ανωμεταφοράς για τον WT3, όπου παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές υετού. Τα αποτελέσματα αυτής της διδακτορικής διατριβής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση και βελτίωση των αποτελεσμάτων πρόγνωσης του μοντέλου που διενεργείται καθημερινά από το Εργαστήριο Μετεωρολογίας του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, ενώ μπορούν να αξιολογηθούν και ευρύτερα από την ερευνητική κοινότητα που ασχολείται με την αριθμητική πρόγνωση καιρού σε τοπικό επίπεδο.

Abstract

This doctoral dissertation investigates the dependence of the predictability of basic meteorological parameters, namely temperature and precipitation, on weather types in the region of Northwestern Greece. The study's findings were used for further research aimed at improving the forecasting model employed.

It has been observed that in the region of Northwestern Greece, the predictive ability of a meteorological model depends on the prevailing weather conditions. The manner in which the predictive ability of a meteorological model is influenced is unclear, particularly in regions with complex terrain, such as Northwestern Greece. For this reason, this doctoral dissertation aims to provide answers to this issue.

For the purposes of this dissertation, the weather types (WTs) prevailing in the region of Northwestern Greece were first identified for a period during which a weather forecasting model would be applied. To identify the WTs, statistical methodologies were combined: (a) Factor Analysis, a variation of Principal Component Analysis, and (b) Cluster Analysis, using meteorological data for the greater region of Epirus, obtained from the ERA5 Reanalysis database. Initially, Factor Analysis was applied to reduce the large number of initial meteorological parameters used, resulting in a smaller number of uncorrelated factors. Subsequently, the factors derived from this analysis were subjected to Cluster Analysis, which identified the final WTs.

The meteorological model used to assess its predictive ability is the Weather Research and Forecasting Model (WRF) and specifically the version 4.1.5. The WRF model is initialized using forecast data from the Global Forecast System (GFS) and is applied in three nested simulation domains, with Northwestern Greece serving as the final domain at the highest horizontal spatial resolution (2 km). WRF simulations were performed for the days closest to each cluster center within each WT. The predicted temperature results at 04 and 12 UTC and daily precipitation were then compared with data from meteorological stations of the National Observatory of Athens. For temperature comparisons, the Cressman method (using the four nearest grid points to the station) was applied, and error statistics were calculated for each station. For precipitation comparisons, a methodology considering precipitation at the nine nearest grid points to the station was used, with error and performance statistics being calculated.

From the application of the aforementioned methods, ten WTs were identified for the region of Northwestern Greece. The results indicate that the model significantly overestimates the 2-meter air temperature at 04 UTC for specific WTs characterized by anticyclonic circulation and for certain inland stations. Additionally, the error and performance statistics for daily precipitation reveal notable differences between WTs. From the study of improving temperature forecast results, it is shown that appropriately modifying specific physical parameterizations significantly enhances the model's predictive ability for WTs and stations with high errors. Furthermore, optimal microphysics and convection parameterizations were identified for WT3, where the highest precipitation values were observed.

The results of this doctoral dissertation can be utilized for evaluating and improving the forecasting results of the model used daily by the Meteorology Laboratory of the University of Ioannina. Also, they can be used by the research community dealing with numerical weather forecast, especially on a local basis.

Πίνακας συντμήσεων και ακρωνυμίων

ΣΥΝΤΜΗΣΗ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΟ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
AGL	Above Ground Level
ARW	Advance Research WRF
CA	Cluster Analysis
CAPE	Convective Available Potential Energy
CSI	Critical Success Index
DD	Decimal Degrees
FA	Factor Analysis
FAR	False Alarm Ratio
FBI	Frequency Bias Index
GFS	Global Forecast System
GSS	Gilbert Skill Score
MAE	Mean Absolute Error
ME	Mean Error
MM5	Pennsylvania State University / National Center for Atmospheric Research Mesoscale Modeling, version 3
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Center for Environmental Protection
PC	Proportion Correct
PCA	Principal Component Analysis
POD	Probability Of Detection
RMSE	Root Mean Square Error
UTC	Coordinated Universal Time
WRF	Weather Research and Forecasting Model
WT	Weather Type

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά για την περιοχή της ΒΔ Ελλάδας

Η βορειοδυτική Ελλάδα είναι μια περιοχή εξαιρετικής γεωγραφικής ποικιλίας και φυσικής ομορφιάς, η οποία καταλαμβάνεται γεωγραφικά από την Ήπειρο και τη Δυτική Μακεδονία. Η Ήπειρος, που βρίσκεται στα δυτικά και βρέχεται από το Ιόνιο Πέλαγος, είναι κυρίως ορεινή και περιλαμβάνει την επιβλητική οροσειρά της Πίνδου. Η Πίνδος είναι η μεγαλύτερη οροσειρά στην Ελλάδα, εκτεινόμενη σχεδόν σε ολόκληρη τη δυτική περιοχή της χώρας και αποτελεί συνέχεια των Ιλλυρικών και Δαλματικών οροσειρών. Στο βόρειο άκρο της βρίσκεται το οροπέδιο της Κορυτσάς στη νοτιοανατολική Αλβανία, ενώ στο νοτιότερο σημείο της καταλήγει στον Κορινθιακό κόλπο. Αυτό το εκτεταμένο σύμπλεγμα βουνών, κορυφών, υψιπέδων και φαράγγιων που διασχίζει την ηπειρωτική Ελλάδα με κατεύθυνση από ΒΔ προς ΝΑ, έχει μήκος περίπου 230 km και μέγιστο πλάτος 70 km. Η οροσειρά της Πίνδου διακρίνεται σε μικρότερες οροσειρές και βουνά, χωρισμένα από χαράδρες και κοιλάδες ποταμών. Η ψηλότερη κορυφή της Πίνδου με υψόμετρο 2.637 m βρίσκεται στο όρος Σμόλικας, το οποίο είναι το δεύτερο ψηλότερο βουνό της Ελλάδας. Η Δυτική Μακεδονία, αν και λιγότερο ορεινή από την Ήπειρο, διαθέτει επίσης σημαντικές γεωγραφικές ιδιαιτερότητες, όπως οι λίμνες των Πρεσπών (Μικρή και Μεγάλη Πρέσπα), της Ορεστίδας (Καστοριάς) και της Βεγορίτιδας, καθώς και οροπέδια και κοιλάδες με σημαντικότερη την κοιλάδα του Αλιάκμονα. Η βορειοδυτική Ελλάδα είναι επίσης γνωστή για τα εντυπωσιακά της φαράγγια με πιο γνωστό το φαράγγι του Βίκου, το οποίο είναι ένα από τα βαθύτερα και στενότερα φαράγγια στον κόσμο. Όλες αυτές οι γεωγραφικές ιδιαιτερότητες της βορειοδυτικής Ελλάδας παίζουν καθοριστικό ρόλο στα καιρικά και κλιματολογικά φαινόμενα που παρατηρούνται στην περιοχή.

Οι δυναμικοί παράγοντες που επηρεάζουν τον καιρό στη βορειοδυτική Ελλάδα κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου του έτους (Οκτώβριος έως Μάρτιος) είναι οι εξής: α) οι υφέσεις που έρχονται από τον Ατλαντικό Ωκεανό καθώς και αυτές που προέρχονται από την περιοχή της Μεσογείου, β) ο Σιβηρικός αντικυκλώνας, ο οποίος εκτείνεται μέχρι την περιοχή με υψηλές πιέσεις και γ) οι αντικυκλώνες της Βόρειας Ευρώπης, οι οποίοι μεταφέρουν γρήγορα ψυχρούς ανέμους. Κατά τη θερμή περίοδο του έτους κυριαρχεί ο συνδυασμός του υποτροπικού αντικυκλώνα του Β Ατλαντικού (Αζωρών) με το θερμικό χαμηλό της ΝΔ Ασίας, ενώ σημαντικό ρόλο στον καιρό των ηπειρωτικών περιοχών της ΒΔ Ελλάδος διαδραματίζει και η ατμοσφαιρική αστάθεια (Κατσούλης, 1970; Lolis et al., 2018).

Η διάταξη της οροσειράς της Πίνδου, που είναι παράλληλη και κοντά στις ακτές του Ιονίου, επηρεάζει σημαντικά τις θερμοκρασίες στην Ήπειρο και τη δυτική Μακεδονία. Η γεωγραφική κατανομή της θερμοκρασίας εξαρτάται κυρίως από το υψόμετρο και τον βαθμό ηπειρωτικότητας, ενώ μόνο στο νότιο πεδινό τμήμα της Ηπείρου, επηρεάζεται από το γεωγραφικό πλάτος, όπου οι ετήσιες ισόθερμες είναι παράλληλες με τους γεωγραφικούς παραλλήλους. Κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου, οι ισόθερμες στα κεντρικά και βόρεια τμήματα είναι σχεδόν παράλληλες με την οροσειρά και τις ακτές. Αντίθετα τη θερμή περίοδο του έτους, στο εσωτερικό και ειδικά πάνω από τα κλειστά λεκανοπέδια, ανατολικά της οροσειράς της Πίνδου, οι ισόθερμες σχηματίζουν κλειστές καμπύλες που καθορίζουν τοπικά μέγιστα. Το χειμώνα, οι στενές παραθαλάσσιες περιοχές του Ιονίου προστατεύονται από τις πολικές αέριες μάζες, οι οποίες συνήθως οφείλονται στην επέκταση του

Σιβηρικού αντικυκλώνα, λόγω της διάταξης των ορεινών όγκων, σε αντίθεση με τις περιοχές ανατολικά των ορεινών όγκων που επηρεάζονται άμεσα από τις ψυχρές αέριες μάζες. Οι ορεινοί όγκοι λειτουργούν ως εμπόδια, αναγκάζοντας τους ψυχρούς ανέμους από τον ανατολικό τομέα να κατέρχονται και να θερμαίνονται αδιαβατικά, συνεισφέροντας έτσι στην αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας των δυτικών παράκτιων περιοχών (Ζάμπakas, 1981). Ως αποτέλεσμα, οι ακτές του Ιονίου είναι θερμότερες από τις ανατολικές ακτές της κεντρικής Ελλάδας κατά τη χειμερινή περίοδο. Αυτή η θερμοκρασιακή διαφορά των ακτών του Ιονίου οφείλεται και στα θερμά νότια ρεύματα της περιοχής, σε αντίθεση με τις ακτές της ανατολικής Ελλάδας που επηρεάζονται από ψυχρά ρεύματα από τον Εύξεινο Πόντο.

Το καθεστώς εμφάνισης υετού στη βορειοδυτική Ελλάδα οφείλεται σε μια σειρά παραγόντων, συμπεριλαμβανομένης της έντονης κυκλωνικής δραστηριότητας κατά τη χειμερινή περίοδο. Οι πορείες των υφέσεων που σχηματίζονται πάνω από τις βορειοδυτικές ακτές της Μεσογείου κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου διέρχονται από τα νότια Βαλκάνια (Alpert et al., 1990; Maheras et al., 2001; Trigo et al., 2002) και συνοδεύονται από νότιους και δυτικούς ανέμους καθώς και από σημαντικές βροχοπτώσεις. Σημαντικοί παράγοντες για την ποσότητα υετού που παρατηρείται στη βορειοδυτική Ελλάδα είναι η γειτνίασή της με το Ιόνιο Πέλαγος, το οποίο εμπλουτίζει τις αέριες μάζες με υδρατμούς από τις νότιες και δυτικές κατευθύνσεις και η παρουσία της οροσειράς της Πίνδου που λειτουργεί ως εμπόδιο, ανυψώνοντας αυτές τις μάζες (Μαριολόπουλος, 1982; Sindosi et al., 2015). Κατά την άνοδό τους, η θερμοκρασία του αέρα μειώνεται, οδηγώντας σε συμπύκνωση των υδρατμών και αύξηση των βροχοπτώσεων στις προσήνεμες πλευρές της οροσειράς της Πίνδου. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, η μέση ετήσια βροχόπτωση που παρατηρείται στην Ήπειρο είναι η υψηλότερη από οποιαδήποτε άλλη περιοχή της Ελλάδας (Σούλης, 1994). Σε αντίθεση στη δυτική Μακεδονία, που βρίσκεται στα ανατολικά της οροσειράς της Πίνδου, οι τιμές υετού που παρατηρούνται είναι αρκετά χαμηλότερες. Κατά τη θερινή περίοδο του έτους, η εμφάνιση υετού παρουσιάζεται στα ηπειρωτικά και οφείλεται συνήθως στα ανοδικά ρεύματα αέρα λόγω θέρμανσης του εδάφους, το οποίο θερμαίνει τα υπερκείμενα στρώματα αέρα τα οποία διαστέλλονται και, υπό την προϋπόθεση ύπαρξης ψυχρών αερίων μαζών στην ανώτερη ατμόσφαιρα (ευνοείται η στατική αστάθεια), ανέρχονται σε μεγάλο ύψος, προκαλώντας τοπικές καταιγίδες κατά τις μεσημβρινές ώρες. Αυτό το είδος υετού ανωμεταφοράς που παρατηρείται κατά τη θερινή περίοδο παρουσιάζει γενικά υψηλότερες τιμές όσο αυξάνεται το υψόμετρο της περιοχής.

1.2 Τύποι καιρού

Η κατανόηση της χωρικής ποικιλομορφίας του κλίματος μπορεί να επιτευχθεί με τη μελέτη των χωρικών προτύπων κυκλοφορίας που αποκαλύπτουν τις επικρατούσες ατμοσφαιρικές συνθήκες σε μια περιοχή μελέτης. Η κατηγοριοποίηση των προτύπων κυκλοφορίας με τη χρήση τύπων καιρού είναι μια καθιερωμένη πρακτική που έχει εφαρμοστεί από πολλούς ερευνητές στο παρελθόν (π.χ. Maheras, 1984; Kalkstein et al., 1987; Littmann, 2000; Brown, 2004; Brown, 2005; Putniković and Tošić, 2018; Piotrowicz and Ciaranek, 2020). Ένας τύπος καιρού (Weather Type, WT) ορίζεται ως ένα σύνολο μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Ο καθορισμός των WTs μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες μεθόδους που βασίζονται είτε σε υποκειμενικά είτε σε αντικειμενικά κριτήρια. Οι υποκειμενικοί ορισμοί στηρίζονται κυρίως στη μετεωρολογική εμπειρία του ερευνητή για την αναγνώριση των ομοιοτήτων των σχετικών παραμέτρων και ακολουθούνται συνήθως στον προσδιορισμό των συνοπτικών ή κυκλοφοριακών τύπων καιρού (Sheridan, 2002; Sheridan, 2003; Boé and Terray, 2008). Η αντικειμενική προσέγγιση βασίζεται κυρίως στη χρήση

πολυμεταβλητών στατιστικών τεχνικών σε μετεωρολογικά δεδομένα (Anagnostopoulou et al., 2009; Hidalgo and Jouglu, 2018; Lolis and Kotsias, 2020). Τα τελευταία χρόνια, η αντικειμενική προσέγγιση προτιμάται για τον ορισμό των WTs και την κατηγοριοποίηση των προτύπων ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας. Χρειάζεται να αναφερθεί όμως ότι στη θεωρούμενη αντικειμενική προσέγγιση, οι περισσότερες διαδικασίες και μέθοδοι κατηγοριοποίησης περιλαμβάνουν βήματα που απαιτούν την παρέμβαση του ερευνητή (όπως ο ορισμός της περιοχής μελέτης, οι μετεωρολογικές παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν, ο αριθμός των τελικών WTs κλπ.), και συνεπώς δεν μπορούν να θεωρηθούν απόλυτα αντικειμενικές (Lolis and Türkeş, 2016). Η πλειοψηφία των πρόσφατων μελετών για την αναγνώριση και κατηγοριοποίηση των WTs περιλαμβάνει την εφαρμογή μιας στατιστικής μεθόδου μείωσης της διαστατικότητας που ακολουθείται από μια στατιστική μεθοδολογία ταξινόμησης (Kalkstein et al., 1996, Dafis et al., 2016). Αυτή η προσέγγιση είναι γνωστή στη βιβλιογραφία ως «φασματική ταξινόμηση» (“spectral clustering”). Οι μετεωρολογικές συνθήκες που περιγράφονται από τους WTs παρέχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη μεταβλητότητα των κλιματικών / καιρικών χαρακτηριστικών στην περιοχή μελέτης. Η μεθοδολογία ορισμού των WTs εφαρμόζεται για μια χρονική διάρκεια που ορίζει ο ερευνητής και μπορεί να κυμαίνεται από λίγα χρόνια μέχρι και αρκετές δεκαετίες, αναδεικνύοντας σε κάθε περίπτωση αξιοσημείωτα ευρήματα που μπορούν να αξιολογηθούν από τον ερευνητή αναλόγως, όπως μελέτη κλιματολογικών τάσεων μιας περιοχής όταν μελετάται μεγάλη χρονική διάρκεια, ή μελέτη τρεχουσών καιρικών συνθηκών όταν η περίοδος μελέτης είναι λίγα χρόνια. Στην παρούσα διατριβή, η περίοδος μελέτης αφορά μια χρονική περίοδο δέκα ετών που είναι ικανοποιητική για τη μελέτη αξιολόγησης αποτελεσμάτων ενός μετεωρολογικού μοντέλου μέσης κλίμακας που εφαρμόζεται στην περιοχή.

1.3 Πρόγνωση καιρού στη ΒΔ Ελλάδα – Τεχνολογίες και μέθοδοι

Η πρόγνωση καιρού στη βορειοδυτική Ελλάδα αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα με ιδιαίτερες δυσκολίες λόγω της γεωγραφικής της ποικιλομορφίας (περίπλοκο έδαφος) και των συχνών αλλαγών στις καιρικές συνθήκες. Διάφορα ερευνητικά κέντρα, πανεπιστήμια και κρατικοί φορείς ασχολούνται με την παρακολούθηση και την πρόγνωση των καιρικών φαινομένων στην Ελλάδα, όπως για παράδειγμα η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ), το Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΙΕΠΒΑ) του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ), το Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ), το Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ), το Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο και το Εργαστήριο Μετεωρολογίας του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Παρακάτω αναφέρονται περισσότερα στοιχεία για την ΕΜΥ και το ΙΕΠΒΑ του ΕΑΑ που ασχολούνται επιχειρησιακά επί πολλά χρόνια με την πρόγνωση καιρού ολόκληρης της Ελλάδας, καθώς και για το Εργαστήριο Μετεωρολογίας του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων το οποίο επικεντρώνεται στην πρόγνωση καιρού ΒΔ Ελλάδος, η οποία είναι και η περιοχή μελέτης της παρούσης διατριβής.

Η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ) ιδρύθηκε το 1931 στον χώρο του τότε νεοσύστατου Υπουργείου Αεροπορίας με κύρια αποστολή τη μετεωρολογική υποστήριξη των φορέων της Εθνικής Άμυνας και της Εθνικής Οικονομίας της Ελλάδας. Η ΕΜΥ της Ελλάδας έχει μια μακρά ιστορία εξέλιξης και εκσυγχρονισμού από την ίδρυσή της. Στην περίοδο 1931-1940, ανέπτυξε Δίκτυο Μετεωρολογικών Σταθμών, ίδρυσε το Τμήμα Προγνώσεων Καιρού και τη Μετεωρολογική Σχολή, ενώ το 1935 έγινε μέλος της Διεθνούς Μετεωρολογικής Οργάνωσης. Μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, η ΕΜΥ προχώρησε σε αναδιοργάνωση και εκσυγχρονισμό, εντασσόμενη αρχικά στο

Υπουργείο Αεροπορίας και στη συνέχεια στο Υπουργείο Εθνικής Άμυνας. Το 1949, η Ελλάδα επικύρωσε τη σύμβαση του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού (World Meteorological Organization, WMO). Στις δεκαετίες του 1950 και 1960, εγκαταστάθηκαν νέοι Μετεωρολογικοί Σταθμοί, Μετεωρολογικά Γραφεία στα αεροδρόμια και αναδιοργανώθηκε ο τομέας της πρόγνωσης. Στις δεκαετίες του 1970 και 1980, εισήχθησαν συστήματα Η/Υ, Μετεωρολογικά Radars και νέα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, ενώ η ΕΜΥ έγινε μέλος του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προγνώσεων (European Centre for Medium – Range Weather Forecasts, ECMWF) και της Ευρωπαϊκής Οργάνωσης για την Εκμετάλλευση των Μετεωρολογικών Δορυφόρων (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, EUMETSAT). Στην πρώτη πενταετία της δεκαετίας του 1990, η ΕΜΥ εγκατέστησε νέο Τηλεπικοινωνιακό Σύστημα, Σύστημα Δορυφορικής Λήψης και Αυτόματους Μετεωρολογικούς Σταθμούς. Στη δεύτερη πενταετία του 1990, με νέες νομοθετικές ρυθμίσεις, σχεδίασε την αναδιοργάνωση των λειτουργικών της δομών και ανέπτυξε διεθνείς συνεργασίες με οργανισμούς όπως τους ECOMET και EUMETNET. Στις αρχές του 21ου αιώνα, η ΕΜΥ προχώρησε σε περαιτέρω εκσυγχρονισμό για να υποστηρίξει τις αυξανόμενες ανάγκες της Εθνικής Άμυνας, της Εθνικής Οικονομίας και του κοινωνικού συνόλου, με το πρόγραμμα εκσυγχρονισμού να βρίσκεται σε εξέλιξη. Σήμερα η ΕΜΥ εκδίδει καθημερινά μεγάλο αριθμό προγνώσεων για τον καιρό (τακτικά δελτία καιρού και ναυτιλίας, έκτακτα δελτία επικινδύνων καιρικών φαινομένων, προγνώσεις για την αεροναυτιλία κλπ.) που παρέχονται δωρεάν στο κοινό και ανακοινώνονται στον ιστότοπό της (ΕΜΥ, 2024).

Το Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΙΕΠΒΑ) αποτελεί ένα από τα τρία Ινστιτούτα του ΕΑΑ, το οποίο είναι το παλαιότερο Ερευνητικό Κέντρο στην Ελλάδα και τα Βαλκάνια. Αρχικά γνωστό ως «Μετεωρολογικό Ινστιτούτο» (ΜΙ), ιδρύθηκε το 1846 και από το 1858 ξεκίνησε συστηματικά τις καθημερινές μετεωρολογικές παρατηρήσεις, οι οποίες συνεχίζονται αδιάκοπα στις εγκαταστάσεις του Ινστιτούτου στο Θησείο. Το ΙΕΠΒΑ διαθέτει την αρχαιότερη και πληρέστερη ιστορική βάση κλιματικών δεδομένων στην Ελλάδα, καλύπτοντας περίοδο άνω του ενάμιση αιώνα. Αρχικά, ήταν η πρώτη μετεωρολογική υπηρεσία της χώρας, δημιουργώντας και λειτουργώντας δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών σε όλη την επικράτεια μέχρι το 1931, όταν το δίκτυο παραδόθηκε στην Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ). Το 1986, μετονομάστηκε σε «Ινστιτούτο Μετεωρολογίας και Φυσικής του Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος» (ΙΜΦΑΠ) για να αντικατοπτρίζει τις νέες δραστηριότητές του, όπως η Φυσική της ατμόσφαιρας και οι ήπιες μορφές ενέργειας. Το Ινστιτούτο αναπτύχθηκε περαιτέρω, επεκτείνοντας τις υποδομές του και ενισχύοντας τις ερευνητικές του δραστηριότητες μέσω συνεργασιών με ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια. Το 1999, το Ινστιτούτο μετονομάστηκε σε Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΙΕΠΒΑ) για να ανταποκριθεί στις νέες προκλήσεις και απαιτήσεις ενός βιώσιμου περιβάλλοντος. Οι δραστηριότητές του επεκτάθηκαν στη μελέτη των επιπτώσεων της ανάπτυξης στο περιβάλλον, την κλιματική αλλαγή, την υδρολογία, τη διαχείριση υδάτινων πόρων, την ποιότητα του αέρα και την εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια. Σήμερα, το ΙΕΠΒΑ έχει αναδειχθεί σε εθνικό «σημείο επαφής» για περιβαλλοντικά ζητήματα και επιδιώκει να ενισχύσει την ανταγωνιστικότητά του, παρέχοντας υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας για την εθνική οικονομία, την κοινωνία και το περιβάλλον. Η μονάδα πρόγνωσης και παρακολούθησης φυσικών καταστροφών σχετιζόμενων με τον καιρό (ΜΕΤΕΟ) παρέχει επιχειρησιακά πλήθος δεδομένων και πληροφοριών μέσω αρκετών δράσεων όπως α) διαχείριση του μεγαλύτερου δικτύου αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών στην Ελλάδα (580 σταθμοί, Δεκέμβριος 2024), β) λειτουργία επιχειρησιακών συστημάτων πρόγνωσης καιρού, όπως κυματισμού, υπεριώδους ακτινοβολίας, μεταφοράς σκόνης και καταιγίδων, για την Ευρώπη και την Ελλάδα γ) παραγωγή δορυφορικών προϊόντων σχετικά με τον καιρό, όπως πιθανότητα βροχόπτωσης, ύψος και πάχος νεφών, παρακολούθηση καταιγίδων, δ) παροχή συστημάτων έγκαιρης

προειδοποίησης έντονων καιρικών φαινομένων, συμπεριλαμβανομένων των πυρο-μετεωρολογικών συνθηκών που επηρεάζουν τις δασικές πυρκαγιές κλπ. (ΙΕΠΒΑ, 2024).

Το Εργαστήριο Μετεωρολογίας του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων πραγματοποιεί καθημερινά πρόγνωση καιρού για τη ΒΔ Ελλάδα από την ίδρυση του το 1970. Μέχρι το 2007, η πρόγνωση καιρού βασιζόταν στη μελέτη χαρτών πρόγνωσης παγκόσμιων μοντέλων και μοντέλων μεγάλης κλίμακας και είχε ως σκοπό την εκπαίδευση των προπτυχιακών και μεταπτυχιακών φοιτητών του Τμήματος Φυσικής, στα πλαίσια των σχετικών μαθημάτων. Από το 2007 και έπειτα, διενεργείται επιχειρησιακή πρόγνωση καιρού με χρήση του μετεωρολογικού μοντέλου MM5 (Pennsylvania State University / National Center for Atmospheric Research Mesoscale Modeling, version 3) υψηλής χωρικής ανάλυσης για την περιοχή της ΒΔ Ελλάδας, το οποίο εγκαταστάθηκε, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος RISKMED (Bartzokas et al., 2010a), με τα αποτελέσματα να παρέχονται δωρεάν στο κοινό και να ανακοινώνονται στην ιστοσελίδα του Εργαστηρίου. Με την ολοκλήρωση του ερευνητικού προγράμματος OFIDIA το 2015, υπήρξε βελτίωση της υπολογιστικής ισχύος του Εργαστηρίου Μετεωρολογίας που είχε ως αποτέλεσμα την περαιτέρω βελτίωση του μετεωρολογικού μοντέλου MM5, όσον αφορά τη χρονική περίοδο της πρόγνωσης καιρού και την κατακόρυφη ανάλυση του μοντέλου. Επίσης στα αποτελέσματα που παράγονται, προστίθενται δείκτες επικινδυνότητας πυρκαγιάς, που έχουν βαθμονομηθεί για την περιοχή, και βελτιώνονται οι ειδοποιήσεις ακραίων καιρικών φαινομένων που αφορούν τις μετεωρολογικές παραμέτρους της θερμοκρασίας, του ανέμου και του υετού. Ακόμη, με την ολοκλήρωση των διασυνοριακών ερευνητικών προγραμμάτων OFIDIA2 και iALARMS το 2020, υπήρξε περαιτέρω βελτίωση της υπολογιστικής ισχύος του Εργαστηρίου Μετεωρολογίας που είχε ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της επιχειρησιακής πρόγνωσης καιρού η οποία πραγματοποιείται πλέον και με τη χρήση ενός νέου μετεωρολογικού μοντέλου, του WRF (Weather Research and Forecasting Model), σε μεγαλύτερη γεωγραφική έκταση της ΒΔ Ελλάδας έτσι ώστε να καλύπτει πλήρως και τη δυτική Μακεδονία. Παράλληλα έγινε επέκταση όλων των παραγόμενων αποτελεσμάτων για το νέο μετεωρολογικό μοντέλο, όπως των δεικτών επικινδυνότητας πυρκαγιάς, των γραφικών απεικόνισης, των ειδοποιήσεων ακραίων καιρικών φαινομένων, της αναζήτησης πληροφορίας καιρού σε οποιοδήποτε σημείο ενδιαφέροντος και της εύκολης εξαγωγής προγνωστικών δεδομένων σε αναγνώσιμη μορφή από τον χρήστη.

Οι τεχνολογίες και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα για την πρόγνωση του καιρού βασίζονται κυρίως σε μετεωρολογικά μοντέλα. Τα δεδομένα από δορυφόρους, μετεωρολογικά ραντάρ και μετεωρολογικούς σταθμούς, συμβάλλουν στη βελτίωση της πρόγνωσης. Τα περιοχικά αριθμητικά μετεωρολογικά μοντέλα, όπως το WRF, χρησιμοποιούνται ευρέως για την πρόγνωση καιρού σε μια περιοχή ενδιαφέροντος. Η λειτουργία αυτών των μοντέλων βασίζεται στην επίλυση εξισώσεων φυσικής, που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση όλων των φυσικών διεργασιών που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα, όπως επίσης και στην επιφάνεια της Γης, η οποία αλληλοεπιδρά με την ατμόσφαιρα. Δεδομένης της πολυπλοκότητας επίλυσης των εξισώσεων που χρησιμοποιούνται σε ένα αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού, η οποία είναι μια χρονοβόρα διαδικασία, είναι απαραίτητη η χρήση υπολογιστικών συστημάτων μεγάλης ισχύος για την έγκαιρη πρόγνωση καιρού. Αυτά τα μοντέλα προσαρμόζονται από τον χρήστη στις τοπικές συνθήκες, χρησιμοποιώντας διάφορες φυσικές παραμετροποιήσεις που παρέχονται, για να παρέχουν ακριβέστερες προγνώσεις. Οι δορυφόροι όπως επίσης και τα radar καιρού, παρέχουν κρίσιμα δεδομένα για την ανάλυση των καιρικών συνθηκών. Οι εικόνες από δορυφόρους όπως οι Meteosat και NOAA, όπως επίσης και των δεδομένων των radar καιρού, χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των καιρικών φαινομένων σε πραγματικό χρόνο και εκτίμηση της εξέλιξης των φαινομένων για πολύ σύντομη περίοδο (μέχρι 2

ώρες σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό). Αυτή η διαδικασία αναφέρεται και ως άμεση πρόγνωση (nowcasting). Επίσης δορυφορικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη τεχνητών νευρωνικών δικτύων που εφαρμόζονται στην πρόγνωση υετού (Rivolta et al., 2006) ή για έρευνες ανάπτυξης μοντέλων βαθιάς εκμάθησης για πρόγνωση σύντομης διάρκειας (π.χ. Ionescu et al., 2021). Ακόμη τα δίκτυα μετεωρολογικών σταθμών που είναι εγκατεστημένα σε όλη την Ελλάδα, συλλέγοντας δεδομένα σχετικά με τη θερμοκρασία, την υγρασία, την ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου και άλλες παραμέτρους, είναι απαραίτητα για την τρέχουσα αποτύπωση των καιρικών συνθηκών. Τα δεδομένα αυτά, είναι κρίσιμα επίσης για τη βαθμονόμηση των μετεωρολογικών μοντέλων, όπως επίσης και για διαδικασίες αρχικοποίησης περιοχικών μετεωρολογικών μοντέλων.

Συνολικά, η πρόγνωση καιρού σε μια περιοχή με πολύπλοκη γεωμορφολογία, όπως αυτή της βορειοδυτικής Ελλάδας, είναι ένα σύνθετο πρόβλημα που απαιτεί συνεργασία μεταξύ πολλών φορέων και την εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών για την ακριβή πρόγνωση και την αντιμετώπιση των καιρικών φαινομένων, τα οποία εμφανίζονται όλο και πιο ακραία, λόγω της κλιματικής κρίσης που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια.

1.4 Τεχνικές επικύρωσης και επαλήθευσης ενός μετεωρολογικού μοντέλου

Η επικύρωση και επαλήθευση ενός μετεωρολογικού μοντέλου είναι κρίσιμες διαδικασίες που διασφαλίζουν την αξιοπιστία και την ακρίβεια των προγνώσεων που παράγονται από το μοντέλο. Η κυριότερη τεχνική επαλήθευσης είναι η στατιστική επαλήθευση, με τον υπολογισμό διάφορων στατιστικών μεγεθών που βοηθάνε στη εξαγωγή συμπερασμάτων όπως:

A) Απόκλιση μέσης τιμής (Bias), η οποία υπολογίζει τη διαφορά μεταξύ των μέσων ή στιγμιαίων τιμών των προγνώσεων του μοντέλου και των παρατηρούμενων τιμών. Αν η τιμή της απόκλισης είναι μεγάλη τότε αυτό υποδεικνύει συστηματική απόκλιση (Bias) του μοντέλου, η οποία μπορεί να σημαίνει είτε υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση της τιμής που προβλέπεται από το μοντέλο, ανάλογα με τον ορισμό που κάνουμε στη διαφορά τιμών.

B) Ρίζα του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (Root Mean Square Error, RMSE), η οποία παρέχει μια συνολική μέτρηση της διαφοράς μεταξύ των προγνώσεων του μοντέλου και των παρατηρήσεων. Λαμβάνει υπόψη τόσο το σφάλμα όσο και το μέγεθός του και είναι μια ποσότητα που μετράει τη μέση απόσταση των προγνώσεων του μοντέλου και των παρατηρήσεων σε ένα μοντέλο παλινδρόμησης. Όσο μικρότερες είναι οι τιμές αυτές, τόσο οι τιμές που προβλέπει το μοντέλο τείνουν στις παρατηρούμενες τιμές.

Γ) Συντελεστής Συσχέτισης (Correlation coefficient), ο οποίος εκτιμά τη σχέση μεταξύ των προγνώσεων του μοντέλου και των παρατηρήσεων. Ο συντελεστής συσχέτισης κυμαίνεται από -1 έως 1, όπου το 1 υποδεικνύει τέλεια θετική συσχέτιση, δηλαδή οι τιμές του μοντέλου και των παρατηρήσεων συν-διακυμαίνονται, το 0 καμία συσχέτιση και το -1 τέλεια αρνητική συσχέτιση.

Άλλη τεχνική επαλήθευσης είναι η Επαλήθευση Κατηγοριών (Categorical Verification), η οποία επικεντρώνεται στην επαλήθευση γεγονότων που μπορούν να κατηγοριοποιηθούν, όπως για παράδειγμα η πρόγνωση βροχόπτωσης ή καταιγίδας, η πρόγνωση ακραίων τιμών ανέμου που υπερβαίνουν ένα κατώφλι και άλλα. Σε αυτή την τεχνική χρησιμοποιούνται πίνακες συνάφειας (contingency tables) που είναι απαραίτητοι στους υπολογισμούς των μεθόδων αξιολόγησης αυτής της τεχνικής. Αυτή η τεχνική επαλήθευσης είναι η μοναδική που μπορεί να μας δείξει αν ένα μοντέλο

μπορεί να επιτύχει ή όχι σε γεγονότα τα οποία χαρακτηρίζονται ως δυαδικά, όπως η βροχόπτωση, που μπορεί να συμβαίνει ή όχι.

Άλλη μια τεχνική επαλήθευσης είναι η Αναδρομική Προσομοίωση (Hindcasting), κατά την οποία εκτελείται ένα μοντέλο πρόγνωσης καιρού χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εισόδου και πλευρικών οριακών συνθηκών πραγματικά δεδομένα ανάλυσης, ή παρατηρήσεων (ιστορικά δεδομένα) έτσι ώστε να γίνει αξιολόγηση της ακρίβειας των προγνώσεων σε σχέση με τα καταγεγραμμένα δεδομένα. Η εφαρμογή αυτής της τεχνικής σε διάφορες μελέτες (Sandeepan et al., 2018; Kim et al., 2021; Tewari et al., 2022) έδειξε ότι βοηθά στην κατανόηση των αδυναμιών του μοντέλου σε γνωστές συνθήκες.

Τέλος, μια τεχνική επαλήθευσης που απαιτεί και αυξημένη υπολογιστική ισχύ, λόγω επαναλαμβανόμενων εκτελέσεων του μοντέλου, είναι η Ανάλυση Ευαισθησίας (Ensemble Forecast), κατά την οποία γίνεται διερεύνηση της αντίδρασης του μοντέλου όταν συμβαίνουν μικρές μεταβολές στις αρχικές συνθήκες ή στις παραμέτρους του μοντέλου. Αρκετές μελέτες (Pan et al., 2018; Wu et al., 2019 κλπ.) έχουν δείξει ότι μέσω αυτής της τεχνικής μπορεί να γίνει μελέτη της ευστάθειας του μοντέλου και της αξιοπιστίας των προγνώσεων του υπό διαφορετικά σενάρια.

Εκτός των τεχνικών επαλήθευσης ενός μετεωρολογικού μοντέλου, σημαντικό είναι επίσης να αναφερθεί και ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να συγκριθούν οι παρατηρήσεις με τα αποτελέσματα ενός μοντέλου. Τα αποτελέσματα ενός μοντέλου, και ιδιαίτερα τα μονόμετρα μεγέθη, ορίζονται στα πλεγματικά σημεία του μοντέλου και αντιπροσωπεύουν μια περιοχή τετραγωνικού πλέγματος που καθορίζεται από την οριζόντια ανάλυση του μοντέλου. Για παράδειγμα, όταν αναφέρεται ότι η οριζόντια ανάλυση ενός μοντέλου είναι 2 km, τότε το κάθε πλεγματικό σημείο εκφράζει ένα στοιχειώδες τετραγωνικό πλέγμα με εμβαδόν ίσο με 4 km². Αυτό σημαίνει ότι για παράδειγμα μια προγνωστική τιμή θερμοκρασίας αντιπροσωπεύει μια περιοχή με εμβαδόν ίσο με 4 km². Από την άλλη μεριά οι παρατηρήσεις γίνονται συνήθως από σημειακούς μετεωρολογικούς σταθμούς που εκφράζουν ένα σημείο. Αρκετοί ερευνητές (Bartzokas et al. 2010b; Matějka et al., 2021; Lee et al., 2023) συγκρίνουν τις τιμές ενός μοντέλου με τις παρατηρήσεις, χρησιμοποιώντας τις τιμές μοντέλου του πλησιέστερου πλεγματικού σημείου με τον μετεωρολογικό σταθμό. Πολλές φορές όμως, η τιμή του μοντέλου στο πλησιέστερο πλεγματικό σημείο στη θέση της παρατήρησης δεν είναι πάντα η πιο αντιπροσωπευτική (Jiménez και Dudhia, 2012) και για τον λόγο αυτό εφαρμόζονται άλλες μέθοδοι με παρεμβολή των δεδομένων πλησιέστερων πλεγματικών σημείων του μοντέλου. Ένας άλλος τρόπος σύγκρισης τιμών, είναι να χρησιμοποιηθούν οι τιμές των τεσσάρων πλησιέστερων πλεγματικών σημείων στον μετεωρολογικό σταθμό και η τελική τιμή του μοντέλου να σταθμιστεί από την απόσταση του καθενός από τον μετεωρολογικό σταθμό και έπειτα να συγκριθεί με την παρατήρηση, όπως ορίζεται από τη μεθοδολογία Cressman (Cressman, 1959). Άλλοι τρόποι σύγκρισης των δεδομένων έχουν μεγαλύτερη ανοχή στη χωρική κατανομή μετεωρολογικών παραμέτρων, όπως της βροχόπτωσης, ορίζοντας μεγαλύτερες περιοχές πλησιέστερων πλεγματικών σημείων στον μετεωρολογικό σταθμό π.χ. εννέα πλησιέστερων πλεγματικών σημείων ή και περισσότερων. Με τον ορισμό μιας μεγαλύτερης περιοχής πλεγματικών σημείων, μπορεί να εντοπιστεί ένα γεγονός, για παράδειγμα βροχόπτωσης, το οποίο συμβαίνει σε πλησιέστερο σημείο του σταθμού, χωρικά όμως μετατοπισμένο και να αποτελεί χρήσιμη πληροφορία στον ερευνητή. Ιδιαίτερα σε πλέγματα υψηλής χωρικής ανάλυσης, μια τέτοια πληροφορία συνεισφέρει ουσιαστικά στα συμπεράσματα μιας μελέτης αξιοπιστίας πρόγνωσης ενός μετεωρολογικού μοντέλου. Ακόμη, είναι επίσης σημαντικό να ληφθούν υπόψη οι παράμετροι εξαγωγής μιας μετεωρολογικής παραμέτρου από το μοντέλο, έτσι ώστε να ταιριάζουν με αυτές της παρατήρησης και να μπορεί να γίνει ορθή σύγκριση τιμών. Για παράδειγμα, σε περίπτωση που το ύψος του ανεμομέτρου ενός

μετεωρολογικού σταθμού που έχει ληφθεί η παρατήρηση δεν είναι σε συμφωνία με το σύνηθες ύψος εξαγωγής του ανέμου από το μοντέλο, το οποίο είναι τα 10 μέτρα, θα πρέπει να γίνει η ανάλογη τροποποίηση των τιμών του μοντέλου στο ύψος που βρίσκονται οι παρατηρήσεις. Επίσης, στην περίπτωση σύγκρισης τιμών θερμοκρασίας αέρα στα 2 μέτρα, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το υψόμετρο της περιοχής του μετεωρολογικού σταθμού και αν αυτό συμφωνεί με το υψόμετρο του ή των πλεγματικών σημείων του μοντέλου που λαμβάνονται υπόψη για τη σύγκριση των τιμών, διαφορετικά θα πρέπει να γίνει η ανάλογη διόρθωση των τιμών θερμοκρασίας του μοντέλου, έτσι ώστε να αντιστοιχούν στις τιμές του υψομέτρου των παρατηρήσεων.

Με την εφαρμογή των μεθόδων επικύρωσης και επαλήθευσης, μπορεί να διασφαλιστεί ότι το μετεωρολογικό μοντέλο λειτουργεί με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια και είναι ικανό να παράγει αξιόπιστες προγνώσεις, λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες και τις προκλήσεις που υπάρχουν εν γένει στις μετεωρολογικές προγνώσεις.

1.5 Στόχος και δομή διδακτορικής διατριβής

Ο στόχος της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη της εξάρτησης του βαθμού προγνωσιμότητας των μετεωρολογικών παραμέτρων της θερμοκρασίας και του υετού από τον τύπο καιρού για την περιοχή της βορειοδυτικής Ελλάδας και η διερεύνηση της δυνατότητας βελτίωσης του. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, αρχικά ορίζονται οι τύποι καιρού που επικρατούν στην περιοχή της βορειοδυτικής Ελλάδας σε μια χρονική περίοδο 10 ετών, χρησιμοποιώντας μετεωρολογικά δεδομένα από τη διεθνή βάση δεδομένων ERA5 του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (European Centre of Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF) για την περιοχή της βορειοδυτικής Ελλάδας, αλλά και για την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, η ατμοσφαιρική κυκλοφορία πάνω από την οποία καθορίζει τους δυναμικούς παράγοντες που επηρεάζουν τον καιρό στην περιοχή μελέτης. Οι τύποι καιρού που ορίζονται χρησιμοποιούνται ως «οδηγός» έτσι ώστε να προσδιοριστούν οι ημέρες της περιόδου μελέτης, για τις οποίες πραγματοποιείται η εκτέλεση του μετεωρολογικού μοντέλου που εξετάζεται. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται το μετεωρολογικό μοντέλο WRF, το οποίο είναι εγκατεστημένο και εκτελείται επιχειρησιακά καθημερινά στο Εργαστήριο Μετεωρολογίας του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Εφαρμόζονται μεθοδολογίες επαλήθευσης του μοντέλου, για τις παραμέτρους της θερμοκρασίας και του υετού, έτσι ώστε να διαπιστωθεί η ακρίβεια των προγνώσεων βάση των προεπιλεγμένων φυσικών παραμετροποιήσεων του μοντέλου, για κάθε μετεωρολογικό σταθμό και για κάθε WT. Τέλος, εφαρμόζονται διαφορετικές φυσικές παραμετροποιήσεις στο μοντέλο, έτσι ώστε να βελτιωθεί η ακρίβεια της πρόγνωσης, σε συγκεκριμένους τύπους καιρού που εμφανίζουν αποκλίσεις των προγνώσεων από τις παρατηρήσεις. Τα αποτελέσματα των δοκιμαστικών βελτιώσεων των προγνώσεων των μετεωρολογικών παραμέτρων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων πρόγνωσης καιρού, ανάλογα τον τύπο καιρού και τον μετεωρολογικό σταθμό. Η παρούσα διατριβή διαρθρώνεται όπως φαίνεται παρακάτω:

Α) Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των WTs, για την εκτέλεση του μετεωρολογικού μοντέλου και για την τελική επαλήθευση του μοντέλου. Επίσης περιγράφονται οι μεθοδολογίες της Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών όσο και της Ανάλυσης κατά Συντάδες, που χρησιμοποιούνται για τον ορισμό των WTs. Ακόμα, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του μετεωρολογικού μοντέλου WRF που χρησιμοποιείται, όπως επίσης οι γεωγραφικές περιοχές εφαρμογής και οι φυσικές παραμετροποιήσεις που χρησιμοποιούνται. Επίσης, παρουσιάζονται οι εξισώσεις φυσικής που επιλύονται από το μοντέλο και ο τρόπος που το μοντέλο

διακριτοποιεί χωρικά την ατμόσφαιρα. Τέλος παρουσιάζονται οι μεθοδολογίες που εφαρμόζονται για τη σύγκριση των δεδομένων μοντέλου και των παρατηρήσεων για τις μετεωρολογικές παραμέτρους της θερμοκρασίας και του υετού.

Β) Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής. Πιο συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 3.1, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας προσδιορισμού των WTs, οι μέσοι χάρτες για συγκεκριμένες μετεωρολογικές μεταβλητές και λεπτομέρειες για τα χαρακτηριστικά κάθε WT που έχει προκύψει από τη διαδικασία. Στο Κεφάλαιο 3.2, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επαλήθευσης των προγνώσεων θερμοκρασίας αέρα του μοντέλου WRF, μέσω της σύγκρισής τους με μετεωρολογικά δεδομένα επίγειων σταθμών, χρησιμοποιώντας τις προεπιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις, όπως εκτελείται δηλαδή το μοντέλο επιχειρησιακά από το Εργαστήριο Μετεωρολογίας του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Επίσης, γίνεται γραφική απεικόνιση όλων των σφαλμάτων θερμοκρασιών που παρατηρούνται σε όλους τους μετεωρολογικούς σταθμούς και για όλους τους WTs. Στο Κεφάλαιο 3.3, αρχικά παρουσιάζεται η κατανομή των μετεωρολογικών δεδομένων υετού επίγειων σταθμών ανά WT. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επαλήθευσης των αποτελεσμάτων πρόγνωσης υετού του μοντέλου WRF, μέσω της σύγκρισής τους με μετεωρολογικά δεδομένα επίγειων σταθμών, χρησιμοποιώντας τις προεπιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις, για τους WTs που υπάρχει αξιόλογος αριθμός περιστατικών υετού. Γίνεται γραφική απεικόνιση των στατιστικών σφαλμάτων ανά WT και εύρος τιμών υετού, όπως επίσης και των συναρτήσεων επίδοσης, έτσι ώστε να γίνει αξιολόγηση των επιδόσεων του μοντέλου ανά WT και κατώφλι τιμών υετού. Στο Κεφάλαιο 3.4, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αξιολόγησης με στόχο τη βελτίωση των προγνώσεων θερμοκρασίας του μοντέλου WRF, χρησιμοποιώντας διάφορες φυσικές παραμετροποιήσεις. Η διαδικασία βελτίωσης αφορά συγκεκριμένους WTs, στους οποίους παρατηρήθηκαν οι μεγαλύτερες αποκλίσεις των προγνωστικών τιμών θερμοκρασίας από τις πραγματικές, σύμφωνα με τη μελέτη επαλήθευσης των προγνώσεων θερμοκρασίας του μοντέλου του Κεφαλαίου 3.2. Η τελική επιλογή των φυσικών παραμετροποιήσεων που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων θερμοκρασίας, καθορίζεται από τα προκαταρκτικά αποτελέσματα μιας μελέτης βελτίωσης των μεγαλύτερων σφαλμάτων που εντοπίστηκαν στους WT9 και WT10. Επίσης γίνεται γραφική απεικόνιση όλων των σφαλμάτων θερμοκρασιών που παρατηρούνται σε όλους τους μετεωρολογικούς σταθμούς, σε συγκεκριμένους WTs και για διάφορες παραμετροποιήσεις του μοντέλου. Στο Κεφάλαιο 3.5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προγνωστικών τιμών υετού για διάφορες φυσικές παραμετροποιήσεις, που έχουν ως σκοπό τον εντοπισμό εκείνων των παραμετροποιήσεων με την καλύτερη βελτίωση αποτελεσμάτων για τον WT3, όπου εμφανίζονται τα περισσότερα συμβάντα υετού ανάμεσα σε όλους τους WTs. Επίσης, γίνεται γραφική απεικόνιση των στατιστικών σφαλμάτων για τον WT3, ανά εύρος τιμών υετού και επιλεγμένης φυσικής παραμετροποίησης, όπως επίσης και των συναρτήσεων επίδοσης, έτσι ώστε να γίνει αξιολόγηση των επιδόσεων του μοντέλου, ανά κατώφλι τιμών υετού και για κάθε φυσική παραμετροποίηση που χρησιμοποιείται. Για τις διαδικασίες βελτιστοποίησης των προγνωστικών τιμών θερμοκρασίας και υετού των Κεφαλαίων 3.4 και 3.5, χρησιμοποιείται ένα μικρότερο δείγμα ημερών από αυτό που χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία επαλήθευσης των αποτελεσμάτων πρόγνωσης. Αυτό γίνεται επειδή οι επαναλαμβανόμενες εκτελέσεις του μοντέλου WRF, για συγκεκριμένο αριθμό ημερών, με τη χρήση διαφορετικών φυσικών παραμετροποιήσεων κάθε φορά, επιφέρουν σημαντικό χρονικό κόστος.

Γ) Στο Κεφάλαιο 4, γίνεται μια σύνοψη των αποτελεσμάτων που προέκυψαν και αναφέρονται τα κύρια συμπεράσματα, καθώς και τα πιο σημαντικά ευρήματα της διατριβής. Επίσης, αναφέρονται οι μελλοντικοί ερευνητικοί στόχοι.

Κεφάλαιο 2

Δεδομένα και Μεθοδολογία

2.1 Μετεωρολογικά δεδομένα

Η χρήση μετεωρολογικών δεδομένων είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό των τύπων καιρού σε μια περιοχή, για την αρχικοποίηση ενός μετεωρολογικού μοντέλου μέσης κλίμακας που χρησιμοποιείται για πρόγνωση καιρού, όπως επίσης και για την επικύρωση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων ενός μοντέλου. Ανάλογα του σκοπού για τον οποίο χρησιμοποιούνται τα δεδομένα, γίνεται χρήση και των κατάλληλων δεδομένων. Για παράδειγμα, για τον προσδιορισμό των τύπων καιρού, ενδείκνυται η χρήση δεδομένων ανάλυσης τα οποία αναφέρονται σε πλέγμα σημείων. Επίσης, για την αρχικοποίηση και την παροχή πλευρικών συνθηκών σε ένα μετεωρολογικό μοντέλο, είναι απαραίτητη η χρήση δεδομένων ανάλυσης ή και πρόγνωσης, ανάλογα της μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται, τα οποία επίσης αναφέρονται σε πλέγμα σημείων. Ακόμη, για την εξακρίβωση της εγκυρότητας μιας μετεωρολογικής πρόγνωσης σε ένα σημείο, είναι απαραίτητη η χρήση επίγειων μετεωρολογικών δεδομένων σε ένα σταθμό. Παρακάτω παρατίθενται όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής.

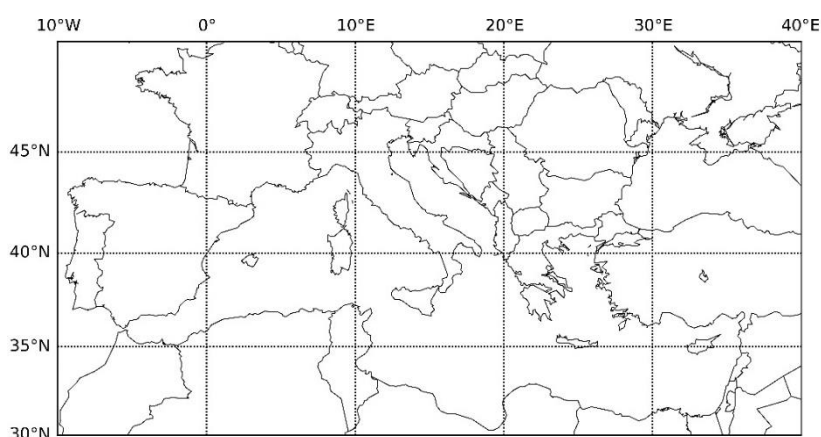
2.1.1 Δεδομένα ERA5 Reanalysis

Η σημασία των δεδομένων αναδρομικής ανάλυσης (reanalysis) στη μετεωρολογία είναι πολύ σημαντική τα τελευταία χρόνια. Βάσεις δεδομένων αναδρομικής ανάλυσης έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν ως πηγή δεδομένων για την παραγωγή των βασικών κλιματολογικών μεταβλητών (Essential Climate Variable, ECV), όπως επίσης και κλιματολογικών δεικτών, τα οποία συνεισφέρουν σε μέγιστο βαθμό στον χαρακτηρισμό του κλίματος της Γης. Οι βάσεις δεδομένων αναδρομικής ανάλυσης, υπολογίζονται από τον βέλτιστο συνδυασμό δεδομένων παρατηρήσεων και μετεωρολογικών μοντέλων, έτσι ώστε να προκύπτουν χάρτες των μετεωρολογικών μεταβλητών χωρίς κενά, εξασφαλίζοντας όσο το δυνατό περισσότερο τη συνοχή και την ακεραιότητα των δεδομένων, ιδιαίτερα όσον αφορά την αναπαράσταση των κύριων κύκλων του συστήματος Γης – ατμόσφαιρας (π.χ. νερού, ενέργειας). Το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (European Centre for Medium – Range Weather Forecasts, ECMWF) έχει μακρά ιστορία στην παραγωγή δεδομένων αναδρομικής ανάλυσης, όπως η ERA-40 και ERA-Interim, με τη βάση δεδομένων ERA5 να αποτελεί την πέμπτη και πιο βελτιωμένη γενιά δεδομένων αναδρομικής ανάλυσης που παράγεται σε σχέση με τις προηγούμενες. Η βάση ERA5 (Hersbach et al., 2020) παρέχει ωριαία δεδομένα με παγκόσμια κάλυψη από το 1940 μέχρι και σήμερα σε οριζόντια χωρική ανάλυση έως και $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, ενώ η κατακόρυφη ανάλυση των δεδομένων περιλαμβάνει 137 επίπεδα, ξεκινώντας από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι της ισοβαρικής επιφάνειας των 1 Pascal. Η βάση δεδομένων ERA5 κάνει χρήση ενός υπερσύγχρονου μοντέλου αριθμητικής πρόγνωσης, έτσι ώστε να αφομοιώσει μια ποικιλία παρατηρήσεων, όπως π.χ. δορυφορικά δεδομένα και δεδομένα επίγειων μετεωρολογικών σταθμών. Το ενσωματωμένο σύστημα πρόγνωσης (Integrated Forecast System, IFS) που χρησιμοποιεί η βάση ERA5 είναι το Cy41r2 το οποίο χρησιμοποιεί τετραδιάστατη ανάλυση μεταβλητών (4D-var) και έχει προκύψει μετά από δέκα χρόνια έρευνας και ανάπτυξης σε όλα τα στοιχεία του προηγούμενου συστήματος πρόγνωσης Cy31r2 στο οποίο βασιζόταν η βάση ERA-Interim. Τα δεδομένα ERA5 Reanalysis, που χρησιμοποιούνται για τους σκοπούς της παρούσας

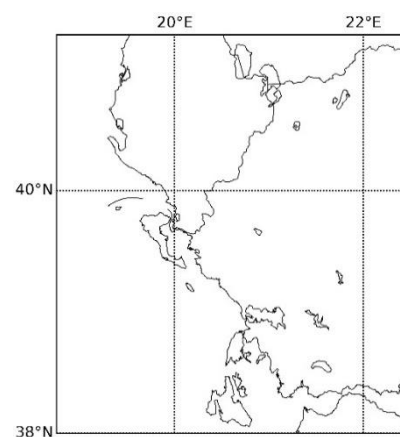
διατριβής και πιο συγκεκριμένα για τον προσδιορισμό των WTs, ο οποίος γίνεται με χρήση στατιστικών μεθόδων, εμφανίζονται στον Πίνακα 2.1 και καλύπτουν τις γεωγραφικές περιοχές που φαίνονται στο Σχήμα 2.1. Η παροχή των δεδομένων γίνεται με χρήση της Υπηρεσίας Κλιματικής Αλλαγής Κοπέρνικος (Copernicus Climate Change Service) και καλύπτει μια χρονική περίοδο 10 ετών, από τις 01/01/2009 έως τις 31/12/2018. Οι επιλογές των μετεωρολογικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται έχουν σκοπό τον λεπτομερή προσδιορισμό των WTs στη βορειοδυτική Ελλάδα.

Πίνακας 2.1. Δεδομένα βάσης ERA5 Reanalysis

A/A	Μετεωρολογική παράμετρος	Χωρική ανάλυση	Χρονική ανάλυση	Περιοχή
1	Θερμοκρασία στα 2 μέτρα	0.25°x0.25°	00, 06, 12, 18, 24 UTC	38.00°B – 41.25°B και 18.75°A – 22.50°A
2	Θερμοκρασία δρόσου στα 2 μέτρα	0.25°x0.25°	00, 06, 12, 18, 24 UTC	38.00°B – 41.25°B και 18.75°A – 22.50°A
3	Ζωνική συνιστώσα ταχύτητας ανέμου στα 10 μέτρα (u)	0.25°x0.25°	00, 06, 12, 18, 24 UTC	38.00°B – 41.25°B και 18.75°A – 22.50°A
4	Μεσημβρινή συνιστώσα ταχύτητας ανέμου στα 10 μέτρα (v)	0.25°x0.25°	00, 06, 12, 18, 24 UTC	38.00°B – 41.25°B και 18.75°A – 22.50°A
5	Συνολική νεφοκάλυψη	0.25°x0.25°	00, 06, 12, 18, 24 UTC	38.00°B – 41.25°B και 18.75°A – 22.50°A
6	Νεφοκάλυψη χαμηλών νεφών	0.25°x0.25°	00, 06, 12, 18, 24 UTC	38.00°B – 41.25°B και 18.75°A – 22.50°A
7	Νεφοκάλυψη μεσαίων νεφών	0.25°x0.25°	00, 06, 12, 18, 24 UTC	38.00°B – 41.25°B και 18.75°A – 22.50°A
8	Νεφοκάλυψη υψηλών νεφών	0.25°x0.25°	00, 06, 12, 18, 24 UTC	38.00°B – 41.25°B και 18.75°A – 22.50°A
9	Διαθέσιμη δυναμική ενέργεια ανωμεταφοράς (CAPE)	0.25°x0.25°	00, 06, 12, 18, 24 UTC	38.00°B – 41.25°B και 18.75°A – 22.50°A
10	Θερμοκρασία στην ισοβαρική επιφάνεια των 850hPa	1°x1°	00, 12, 24 UTC	30°B – 50°B και 10°Δ – 40°A
11	Γεωδυναμικό ύψος της ισοβαρικής επιφάνειας των 500hPa	1°x1°	00, 12, 24 UTC	30°B – 50°B και 10°Δ – 40°A
12	Γεωδυναμικό ύψος της ισοβαρικής επιφάνειας των 1000hPa	1°x1°	00, 12, 24 UTC	30°B – 50°B και 10°Δ – 40°A



(α)



(β)

Σχήμα 2.1. Γεωγραφικές περιοχές (α) της Μεσογείου και (β) της βορειοδυτικής Ελλάδας, στις οποίες αναφέρονται τα δεδομένα ERA5 Reanalysis που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή.

Από τις μετεωρολογικές παραμέτρους του Πίνακα 2.1 να σημειωθεί ότι: α) η νεφοκάλυψη χαμηλών νεφών ορίζεται ως το ποσοστό νέφωσης που υπολογίζεται από τα νέφη που εμφανίζονται ανάμεσα στις ισοβαρικές επιφάνειες της πίεσης της επιφάνειας του εδάφους μέχρι το $0.8 * \text{πίεση της επιφάνειας του εδάφους}$, β) η νεφοκάλυψη μεσαίων νεφών ορίζεται ως το ποσοστό νέφωσης που υπολογίζεται από τα νέφη που εμφανίζονται ανάμεσα στις ισοβαρικές επιφάνειες από το $0.8 * \text{πίεση της επιφάνειας του εδάφους}$ μέχρι το $0.45 * \text{πίεση της επιφάνειας του εδάφους}$, γ) η νεφοκάλυψη υψηλών νεφών ορίζεται ως το ποσοστό νέφωσης που υπολογίζεται από τα νέφη που εμφανίζονται στις ισοβαρικές επιφάνειες με πίεση μικρότερη από το $0.45 * \text{πίεση της επιφάνειας του εδάφους}$ (ECMWF, 2024).

Να σημειωθεί επίσης ότι για τις μετεωρολογικές παραμέτρους, που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των μεγάλης κλίμακας χαρακτηριστικών της γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας, γίνεται χρήση της χωρικής ανάλυσης $1^\circ \times 1^\circ$, δεδομένου του ότι δεν απαιτείται υψηλότερη χωρική ανάλυση για την εξαγωγή των παραπάνω μεγάλης κλίμακας χαρακτηριστικών, όπως άλλωστε αποδείχθηκε από δοκιμαστικές αναλύσεις με χρήση δεδομένων υψηλής ανάλυσης $0.25^\circ \times 0.25^\circ$.

2.1.2 Δεδομένα μοντέλου GFS

Για την εκτέλεση ενός περιοχικού μοντέλου μέσης κλίμακας, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν μετεωρολογικά δεδομένα από ένα μοντέλο πρόγνωσης παγκόσμιας κλίμακας, εάν η χρήση του γίνεται με σκοπό την πρόγνωση καιρού μιας περιοχής. Για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής, γίνεται χρήση των μετεωρολογικών δεδομένων του μοντέλου πρόγνωσης καιρού με την ονομασία Παγκόσμιο Σύστημα Πρόγνωσης (Global Forecast System, GFS), που εκτελείται επιχειρησιακά από το Εθνικό Κέντρο Περιβαλλοντικής Προστασίας (National Center for Environmental Protection, NCEP). Το μοντέλο GFS συνδυάζει τέσσερα ξεχωριστά μοντέλα προσομοίωσης για την ατμόσφαιρα, τον ωκεανό, το έδαφος και τον θαλάσσιο πάγο, τα οποία αλληλοεπιδρούν έτσι ώστε να απεικονίζουν με ακρίβεια της καιρικές συνθήκες της Γης. Το Παγκόσμιο Σύστημα Αφομοίωσης Δεδομένων (Global Data Assimilation System, GDAS), το οποίο εκτελεί ένα σχήμα αφομοίωσης δεδομένων τετραδιάστατης ανάλυσης υβριδικού συνόλου μεταβλητών (4D hybrid ensemble-variational data), παράγει τις αρχικές συνθήκες για την πρόγνωση του μοντέλου GFS. Το μοντέλο GFS εκτελείται τέσσερις φορές καθημερινά, με ώρες εκκίνησης 00, 06, 12 και 18 UTC, παράγοντας προγνώσεις έως και 16 ημέρες μπροστά από την ημερομηνία εκκίνησης του μοντέλου. Η τελευταία έκδοση του μοντέλου GFS (GFS v16), έχει οριζόντια ανάλυση περίπου 13 km και κατακόρυφη ανάλυση 127 στρωμάτων. Η παροχή των δεδομένων του μοντέλου GFS γίνεται απευθείας από τα Εθνικά Κέντρα Περιβαλλοντικής Πληροφορίας (National Centers for Environmental Information, NCEI), μέσω του Συστήματος Αιτήματος Πληροφοριών Αρχείου (Archive Information Request System, AIRS) σε μορφότυπο GRIB2. Για την αρχικοποίηση, όπως επίσης και για την παροχή πλευρικών οριακών συνθηκών, του περιοχικού μοντέλου πρόγνωσης καιρού που εκτελείται για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής, χρησιμοποιούνται δεδομένα του μοντέλου GFS πρόγνωσης, χωρικής ανάλυσης $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ για συγκεκριμένες ημέρες εντός της χρονικής περιόδου μελέτης, από τις 01/01/2009 έως τις 31/12/2018. Τα δεδομένα GFS, που εισάγονται στο περιοχικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού, παρέχονται ανά 6 ώρες, από την ώρα έναρξης έως τη λήξη της πρόγνωσης, η οποία πραγματοποιείται για συνολικά 36 και 60 ώρες. Οι μεταβλητές που περιλαμβάνουν τα δεδομένα GFS, αποτελούνται τόσο από μετεωρολογικά δεδομένα επιφανείας όσο και καθ' ύψος σε ισοβαρικές επιφάνειες. Μερικές από τις μεταβλητές που περιέχονται στα δεδομένα GFS είναι οι εξής: θερμοκρασία αέρα και σχετική υγρασία στα 2 μέτρα από την επιφάνεια

της Γης, ζωνική και μεσημβρινή συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου στα 10 μέτρα από την επιφάνεια, ατμοσφαιρική πίεση ανηγμένη στη μέση στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας και ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια του εδάφους, θερμοκρασία και υγρασία επιφάνειας εδάφους και στρωμάτων εντός αυτού. Επίσης, τα δεδομένα GFS καθ' ύψος αφορούν τη θερμοκρασία, τη ζωνική και μεσημβρινή συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου, τη σχετική υγρασία και το ύψος της ισοβαρικής επιφάνειας. Αξίζει να σημειωθεί, ότι λόγω των συνεχών βελτιώσεων του μοντέλου GFS κατά την περίοδο λειτουργίας του, η οποία περιλαμβάνει και την περίοδο μελέτης, τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση του περιοχικού μοντέλου πρόγνωσης καιρού προς το τέλος της περιόδου μελέτης προκύπτουν από βελτιωμένες εκδόσεις του μοντέλου GFS σε διάφορα μέρη αυτού. Αυτό σημαίνει ότι οι αρχικές συνθήκες εκτέλεσης του μοντέλου WRF προς το τέλος της περιόδου μελέτης είναι πιο ακριβείς (λόγω επιμέρους βελτιώσεων του μοντέλου GFS) από ότι στην αρχή της περιόδου μελέτης. Οι βελτιώσεις του μοντέλου GFS, που εφαρμόστηκαν κατά τη χρονική διάρκεια της επιχειρησιακής λειτουργίας του, αφορούν: την κατακόρυφη συντεταγμένη, διάφορες παραμετροποιήσεις φυσικών διεργασιών, ακτινοβολίας, επιφάνειας εδάφους κλπ.. Για παράδειγμα, μία από τις αναβαθμίσεις του μοντέλου GFS στις 11/05/2016 αφορούσε την αύξηση των κατακόρυφων επίπεδων (ισοβαρικές επιφάνειες) από 27 σε 32, στα οποία παρέχονται δεδομένα καθ' ύψος, όπως επίσης και την υιοθέτηση νέου συστήματος αφομοίωσης δεδομένων (4-D Hybrid Ensemble-Variational data assimilation).

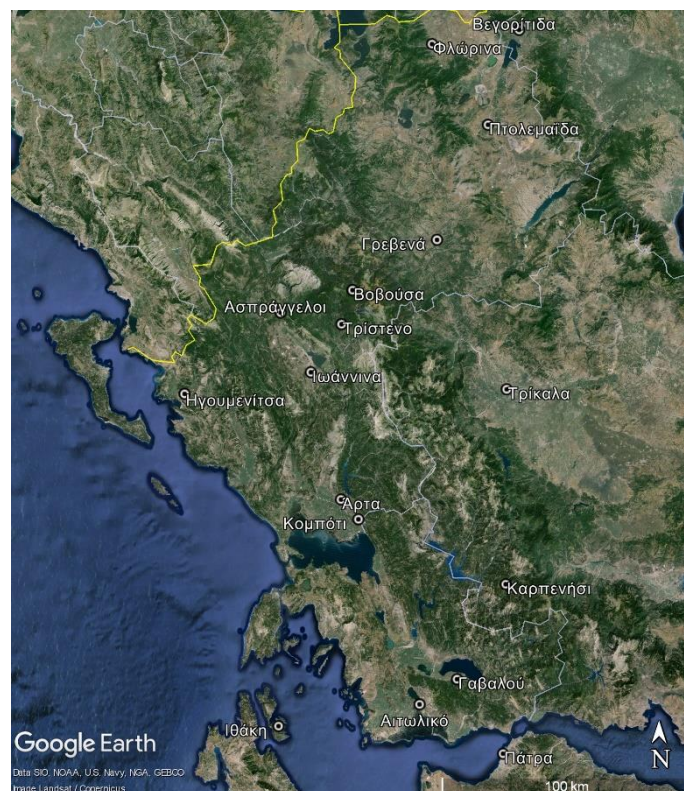
2.1.3 Δεδομένα μετεωρολογικών σταθμών Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών

Για την επικύρωση και επαλήθευση των δεδομένων ενός μοντέλου πρόγνωσης καιρού, είναι απαραίτητη η χρήση δεδομένων μετεωρολογικών σταθμών. Στην παρούσα διατριβή γίνεται χρήση των δεδομένων από το δίκτυο αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ), ο τύπος των οποίων είναι Davis Vantage Pro 2 και οι οποίοι μετρούν όλες τις βασικές μετεωρολογικές παραμέτρους, δηλαδή ατμοσφαιρική πίεση, θερμοκρασία, σχετική υγρασία, βροχόπτωση και διεύθυνση και ταχύτητα του ανέμου (Lagouvardos et al., 2017). Ορισμένοι σταθμοί καταγράφουν επίσης, την ηλιακή και υπεριώδη ακτινοβολία. Όλες οι καταγραφές, οι οποίες γίνονται ανά 10 λεπτά, συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο από το ΕΑΑ και αφού περάσουν από ποιοτικό έλεγχο, αρχειοθετούνται για μελλοντική χρήση. Οι σταθμοί βρίσκονται εγκατεστημένοι σε κτήρια ή αγροτεμάχια τα οποία ανήκουν σε τοπικές αρχές, σχολεία, πανεπιστήμια, μοναστήρια ή ιδιώτες. Αυτή τη στιγμή το δίκτυο σταθμών του ΕΑΑ είναι το πυκνότερο δίκτυο αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών στην Ελλάδα, συμπληρώνοντας το δίκτυο σταθμών της Ελληνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ). Για τη διατήρηση του δικτύου σταθμών του ΕΑΑ, εφαρμόζονται οι ακόλουθες προϋποθέσεις, όσον αφορά την εγκατάσταση νέων σταθμών στο δίκτυο: Α) η συμμόρφωση με τις κατευθυντήριες οδηγίες εγκατάστασης αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών του Παγκόσμιου Οργανισμού Μετεωρολογίας (World Meteorological Organization, WMO), όσον είναι το δυνατόν εφικτό, Β) η διασφάλιση σύνδεσης ίντερνετ στους αυτόματους σταθμούς, έτσι ώστε να επιτρέπεται η μετάδοση και εμφάνιση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και Γ) η διασφάλιση συνεργασιών με τοπικούς εθελοντές ή με εργαζόμενους τοπικών αρχών που δέχονται να υποστηρίξουν εθελοντικά την επιχειρησιακή λειτουργία των σταθμών, σε περίπτωση που χρειαστεί να παρέμβουν στη θέση του σταθμού αν υπάρξει κάποια δυσλειτουργία κάποιου αισθητήρα ή της επικοινωνιακής σύνδεσης. Για την εγκατάσταση ενός σταθμού σε μια τοποθεσία, έχουν επίσης ληφθεί υπόψη τα εξής: α) η περιοχή εγκατάστασης σταθμού να επιλέγεται έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατό μακριά από εμπόδια, όπως κτήρια και δένδρα και β) να διασφαλίζεται η τηλεπικοινωνιακή σύνδεση του σταθμού με τον κεντρικό διακομιστή του ΕΑΑ, έτσι ώστε να είναι εφικτή και η μετάδοση σε πραγματικό χρόνο των

δεδομένων σε ένα ευρύ φάσμα χρηστών του ίντερνετ. Τα χαρακτηριστικά των μετεωρολογικών σταθμών του δικτύου του ΕΑΑ που χρησιμοποιούνται για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής εμφανίζονται στον Πίνακα 2.2, ενώ στο Σχήμα 2.2 εμφανίζεται και η γεωγραφική κατανομή τους στην περιοχή μελέτης.

Πίνακας 2.2. Γεωγραφικά χαρακτηριστικά μετεωρολογικών σταθμών που χρησιμοποιούνται για επικύρωση και επαλήθευση των δεδομένων του μοντέλου πρόγνωσης καιρού.

A/A	Όνομα σταθμού	Γεωγρ. πλάτος (DD)	Γεωγρ. μήκος (DD)	Υψόμετρο (m)
1	Αιτωλικό	38.44	21.36	3
2	Ασπράγγελοι	39.83	20.72	945
3	Φλώρινα	40.79	21.42	637
4	Γαβαλού	38.53	21.53	55
5	Γρεβενά	40.09	21.44	510
6	Ιωάννινα	39.62	20.86	475
7	Καρπενήσι	38.87	21.75	700
8	Τρίκαλα	39.56	21.76	163
9	Τρίστενο	39.79	21.00	940
10	Βεγορίτιδα	40.84	21.83	647
11	Βοβούσα	39.91	21.05	1024
12	Άρτα	39.17	21.00	50
13	Ηγουμενίτσα	39.54	20.28	77
14	Ιθάκη	38.36	20.72	10
15	Κομπότι	39.10	21.08	75
16	Πάτρα	38.26	21.74	6
17	Πτολεμαΐδα	40.50	21.68	606



Σχήμα 2.2. Γεωγραφική κατανομή χρησιμοποιούμενων μετεωρολογικών σταθμών του ΕΑΑ.

Να σημειωθεί ότι για την τελική επιλογή των μετεωρολογικών σταθμών που χρησιμοποιούνται, λαμβάνεται υπόψη η πληρότητα των δεδομένων κάθε σταθμού, για τη χρονική περίοδο μελέτης, η οποία αποφασίζεται ότι πρέπει να υπερβαίνει το 95% για κάθε σταθμό που χρησιμοποιείται για την επικύρωση και επαλήθευση των δεδομένων του μοντέλου πρόγνωσης καιρού. Ακόμη, οι λεπτομέρειες της θέσης, στην οποία βρίσκεται εγκατεστημένος ένας σταθμός, λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή ή όχι του συγκεκριμένου σταθμού ανάλογα με την παράμετρο. Για παράδειγμα, οι μετεωρολογικοί σταθμοί που βρίσκονται εγκατεστημένοι στο έδαφος είναι κατάλληλοι για σύγκριση των τιμών των μετεωρολογικών παραμέτρων της θερμοκρασίας αέρα, της ταχύτητας ανέμου και του υετού με αυτές του μοντέλου πρόγνωσης καιρού, ενώ αυτοί που βρίσκονται εγκατεστημένοι σε οροφές κτηρίων, θεωρούνται κατάλληλοι για σύγκριση των τιμών υετού αλλά δε χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση των τιμών της θερμοκρασίας αέρα και της ταχύτητας ανέμου. Για την επαλήθευση των τιμών θερμοκρασιών στα 2 μέτρα χρησιμοποιούνται 11 μετεωρολογικοί σταθμοί του Πίνακα 2.2 από A/A 1 έως και 11, ενώ για την επαλήθευση τιμών υετού χρησιμοποιούνται και οι 17 μετεωρολογικοί σταθμοί του Πίνακα 2.2.

2.2 Μεθοδολογία

Για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής, και ειδικότερα για τον προσδιορισμό των τύπων καιρού, εφαρμόζονται συνδυαστικά οι στατιστικές μεθοδολογίες της Παραγοντικής Ανάλυσης και της Ανάλυσης κατά Συντάδες, οι οποίες αναλύονται παρακάτω. Επίσης, παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας του μετεωρολογικού μοντέλου WRF και πως εφαρμόζεται στην παρούσα διατριβή. Ακόμη, αναφέρονται οι μέθοδοι σύγκρισης των τιμών θερμοκρασίας και υετού από το μοντέλο WRF με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από τους μετεωρολογικούς σταθμούς του δικτύου του ΕΑΑ.

2.2.1 Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (PCA)

Η Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (Principal Component Analysis, PCA) είναι μια πολυμεταβλητή στατιστική μέθοδος που χρησιμοποιείται από πολλούς ερευνητές σε διάφορα επιστημονικά πεδία, για την αντικατάσταση ενός συνόλου p εν γένει συσχετιζόμενων αρχικών μεταβλητών ($x_1, x_2, \dots, x_p$) σε ένα σύνολο m ($m \ll p$) ασυσχέτιστων μεταξύ τους μεταβλητών ($PC_1, PC_2, \dots, PC_m$), που ονομάζονται Κύριες Συνιστώσες (Principal Components, PCs). Στην παρούσα διατριβή, χρησιμοποιείται μια παραλλαγή της PCA, συγκεκριμένα το μοντέλο της Παραγοντικής Ανάλυσης (Factor Analysis, FA) που βασίζεται στις Κύριες Συνιστώσες και παρουσιάζει μικρές διαφορές τόσο στη μαθηματική βάση όσο και στον τρόπο εφαρμογής (πρακτικά οι δύο μέθοδοι είναι σχεδόν ισοδύναμες). Οι παράγοντες F_j είναι πολύ λιγότεροι από τις αρχικές μεταβλητές ($m \ll p$), αλλά ερμηνεύουν μεγάλο μέρος της αρχικής πληροφορίας. Οι αρχικές μεταβλητές μπορούν να εκφραστούν ως γραμμικός συνδυασμός των παραγόντων, σύμφωνα με την εξίσωση 2.1.

$$X_i = g_{i1}F_1 + g_{i2}F_2 + \dots + g_{im}F_m + e_i \quad (2.1)$$

όπου οι συντελεστές $g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{im}$ ονομάζονται φορτία των παραγόντων (factor loadings) και δείχνουν τη συσχέτιση της μεταβλητής X_i με κάθε έναν από τους παράγοντες. Το άθροισμα $\sum_{j=1,m} g_{ij}^2$ καλείται εταιρικότητα (communality) και αντιπροσωπεύει το ποσοστό της διακύμανσης της μεταβλητής X_i που εξηγείται από τους m παράγοντες. Η διακύμανση του e_i αντιπροσωπεύει το ποσοστό της διακύμανσης της μεταβλητής X_i που δεν μπορεί να εξηγηθεί από τους m παράγοντες και

ονομάζεται ιδιαιτερότητα (specificity) (Manly, 1986). Αναλυτικά, η εφαρμογή της μεθόδου περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. Εφαρμογή Ανάλυσης σε Κύριες Συνιστώσες

- Κανονικοποίηση των αρχικών p μεταβλητών, ώστε να έχουν μέση τιμή μηδέν και διακύμανση ίση με τη μονάδα.
- Υπολογισμός του πίνακα συσχετίσεων των αρχικών μεταβλητών.
- Υπολογισμός των ιδιοτιμών $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ του πίνακα συσχετίσεων και των αντίστοιχων ιδιοδιανυσμάτων $b_1, b_2, \dots, b_p$. Η ιδιοτιμή λ_j αντιπροσωπεύει τη διακύμανση της j -οστής κύριας συνιστώσας και τα στοιχεία του ιδιοδιανύσματος b_j αποτελούν τους συντελεστές, όπως φαίνεται στην εξίσωση 2.2:

$$PC_j = b_{j1}X_1 + b_{j2}X_2 + \dots + b_{jp}X_p \quad (2.2)$$

2. Υπολογισμός των X_i ως γραμμικό συνδυασμό των κυρίων συνιστωσών (εξίσωση 2.3)

$$X_i = b_{1i}PC_1 + b_{2i}PC_2 + \dots + b_{pi}PC_p \quad (2.3)$$

3. Διατήρηση m κυρίων συνιστωσών

$$X_i = b_{1i}PC_1 + b_{2i}PC_2 + \dots + b_{mi}PC_m + e_i \quad (2.4)$$

όπου το e_i αποτελεί γραμμικό συνδυασμό των υπολοίπων κυρίων συνιστωσών $PC_{m+1}, PC_{m+2}, \dots, PC_p$.

4. Μετατροπή των κυρίων συνιστωσών PC_j σε παράγοντες διαιρώντας τις με την τυπική απόκλισή τους, η οποία είναι $\sqrt{\lambda_j}$, ώστε να έχουν μέση τιμή μηδέν και διακύμανση ίση με τη μονάδα. Τότε η εξίσωση 2.4 μετασχηματίζεται σε:

$$X_i = a_{i1}F_1 + a_{i2}F_2 + \dots + a_{im}F_m + e_i \quad (2.5)$$

όπου $a_{ij} = \sqrt{\lambda_j}b_{ij}$ και $F_j = PC_j/\sqrt{\lambda_j}$, με τις μεταβλητές αυτές να ονομάζονται προσωρινοί παράγοντες (provisional factors).

5. Ορθογώνια περιστροφή “varimax” των προσωρινών παραγόντων F_j με σκοπό την εύρεση νέων παραγόντων F_j^* , των οποίων τα φορτία θα είναι μεγαλύτερα κατά απόλυτη τιμή από τα προηγούμενα ώστε η κατάταξη των αρχικών μεταβλητών σε κάποιον παράγοντα να είναι καλύτερη (Richman, 1986). Αυτό επιτυγχάνεται με τη μεγιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των φορτίων του κάθε παράγοντα $F_j \sum_{i=1,p} a_{ij}^2$, αφού αυτό είναι μέτρο της ολικής διακύμανσης των αρχικών μεταβλητών που εξηγεί κάθε παράγοντας j . Έτσι προκύπτει η νέα εξίσωση:

$$X_i = g_{i1}F_1^* + g_{i2}F_2^* + \dots + g_{im}F_m^* + e_i \quad (2.6)$$

όπου οι νέοι παράγοντες F_j^* καλούνται περιστραμμένοι παράγοντες (rotated factors). Στη συνέχεια, για λόγους απλότητας, οι περιστραμμένοι παράγοντες θα αναφέρονται απλά ως παράγοντες και θα συμβολίζονται με F_j . Κατά την εφαρμογή της FA είναι απαραίτητο να ληφθεί απόφαση σχετικά με

τον αριθμό m των στατιστικά σημαντικών παραγόντων που πρέπει να διατηρηθούν. Για τον σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορα κριτήρια, όπως αυτά που παρατίθενται:

α) Guttman: Ο αριθμός των παραγόντων που θα διατηρηθούν είναι ίσος με τον αριθμό των ιδιοτιμών του πίνακα συσχετίσεων των αρχικών μεταβλητών που έχουν τιμή μεγαλύτερη από τη μονάδα.

β) Scree: Το διάγραμμα Scree είναι μια γραφική παράσταση των ιδιοτιμών του πίνακα συσχετίσεων των αρχικών μεταβλητών, ταξινομημένων από την υψηλότερη στη χαμηλότερη. Σύμφωνα με αυτό το διάγραμμα, ο αριθμός των παραγόντων που διατηρούνται είναι ίσος με τον αριθμό των σημείων που αποκλίνουν από την ευθεία γραμμή.

γ) Lev: Αυτό το κριτήριο είναι παρόμοιο με το κριτήριο Scree, αλλά στο διάγραμμα χρησιμοποιούνται οι λογάριθμοι των ιδιοτιμών.

δ) Monte Carlo: Ο αριθμός των παραγόντων πρέπει να ισούται με τον αριθμό των ιδιοτιμών που είναι μεγαλύτερες από το 95% εκείνων που προκύπτουν από τη χρήση τυχαίων δεδομένων.

ε) Αθροιστικό ποσοστό διακύμανσης 80-90% και αποτελέσματα που επιδέχονται φυσική ερμηνεία (Bartzokas and Metaxas, 1993).

Για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής, η επιλογή των στατιστικά σημαντικών παραγόντων γίνεται με χρήση του διαγράμματος Scree σε συνδυασμό με τη φυσική ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Jolliffe, 1986; Bartzokas and Metaxas, 1993).

2.2.2 Ανάλυση κατά Συστάδες (CA)

Η Ανάλυση κατά Συστάδες (Cluster Analysis, CA) είναι μια στατιστική μέθοδος που έχει ως σκοπό να κατατάζει ένα πλήθος n παρατηρήσεων, οι οποίες περιγράφονται από m μεταβλητές, σε k ομάδες, έτσι ώστε κάθε ομάδα να παρουσιάζει όσο το δυνατό μεγαλύτερο βαθμό ομοιογένειας αλλά και ταυτόχρονα να διαφέρει όσο το δυνατό περισσότερο από τις υπόλοιπες ομάδες (Sharma, 1995). Για την εφαρμογή της CA ακολουθούνται τα εξής βήματα: α) επιλογή ενός μέτρου ομοιότητας, β) επιλογή τύπου της μεθόδου ομαδοποίησης και γ) εφαρμογή μεθοδολογίας επιλογής του πλήθους των συστάδων.

Το μέτρο ομοιότητας που χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή είναι η τετραγωνική ευκλείδεια απόσταση των παρατηρήσεων στον m -διάστατο χώρο, όπως φαίνεται στην εξίσωση 2.7

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{l=1,m} (x_{il} - x_{jl})^2} \quad (2.7)$$

όπου D_{ij} είναι η απόσταση μεταξύ της i και j παρατήρησης, x_{il} είναι η τιμή της l μεταβλητής για την i παρατήρηση, x_{jl} είναι η τιμή της l μεταβλητής για την j παρατήρηση και m είναι το πλήθος των μεταβλητών που περιγράφουν κάθε παρατήρηση. Συνήθως, για να αποφευχθεί η επίδραση των διαφορετικών κλιμάκων στις οποίες μετρούνται οι μεταβλητές, οι τιμές των μεταβλητών κανονικοποιούνται έτσι ώστε όλες οι μεταβλητές να έχουν μέση τιμή ίση με το μηδέν και διακύμανση ίση με τη μονάδα. Στην περίπτωση που έχει προηγηθεί η εφαρμογή της PCA, οι μεταβλητές που προκύπτουν είναι ήδη κανονικοποιημένες.

Υπάρχουν δυο βασικές τεχνικές για την κατάταξη των παρατηρήσεων σε ομάδες, η ιεραρχική και η μη ιεραρχική. Για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής, εφαρμόζεται η μη ιεραρχική τεχνική των k -μέσων (nonhierarchical k -means) (Davis και Walker 1992; Kalkstein et al., 1996) που αναλύεται παρακάτω. Σε αυτή τη μέθοδο θεωρείται εξ αρχής ότι είναι γνωστός ο αριθμός των ομάδων που πρέπει να διατηρηθούν. Για αυτό τον λόγο, είτε πρέπει με κάποιο τρόπο να διαπιστωθεί πόσες ομάδες μπορεί να υπάρχουν στα αρχικά δεδομένα, είτε πρέπει η μέθοδος να εφαρμοστεί πολλές φορές για διαφορετικό αριθμό ομάδων και με κατάλληλα κριτήρια να επιλεγεί τελικά ο αριθμός των ομάδων που πρέπει να διατηρηθούν, τεχνική που εφαρμόζεται στην παρούσα διατριβή. Τα βήματα της υπολογιστικής διαδικασίας που ακολουθούνται σε αυτή τη μέθοδο είναι τα ακόλουθα:

α) Επιλογή των αρχικών κέντρων των k ομάδων. Η επιλογή γίνεται ακολουθώντας τα εξής βήματα. Επιλέγονται οι k πρώτες παρατηρήσεις ως αρχικά κέντρα. Υπολογίζονται οι αποστάσεις των κέντρων μεταξύ τους και των αποστάσεων των υπόλοιπων παρατηρήσεων από τα ήδη υπάρχοντα κέντρα. Εάν η απόσταση δυο κέντρων μεταξύ τους είναι μικρότερη από την απόσταση κάποιας παρατήρησης από ένα από αυτά τα κέντρα, τότε τα δυο κέντρα, αυτό με τη μικρότερη απόσταση από την παρατήρηση, αντικαθίσταται από αυτή την παρατήρηση. Τα δυο προηγούμενα βήματα επαναλαμβάνονται έτσι ώστε οι αποστάσεις των κέντρων μεταξύ τους να είναι όλες μεγαλύτερες από τις αποστάσεις κάθε παρατήρησης από κάθε κέντρο.

β) Κατάταξη κάθε παρατήρησης σε μια ομάδα με το κριτήριο η απόσταση της παρατήρησης από κέντρο κάθε ομάδας να είναι η μικρότερη από την απόσταση της από τα κέντρα των άλλων ομάδων.

γ) Με την ολοκλήρωση της κατάταξης όλων των παρατηρήσεων, ακολουθεί ο επαναπροσδιορισμός των κέντρων ομάδων, λαμβάνοντας ως νέο κέντρο το διάνυμα των μέσων των παρατηρήσεων της ομάδας.

δ) Επανάληψη των βημάτων β και γ, ωστόσο να μην υπάρχουν διαφορές ανάμεσα στα προηγούμενα και στα νέα κέντρα των ομάδων.

Στην παρούσα διατριβή, για την επιλογή του αριθμού των ομάδων χρησιμοποιείται συμβουλευτικά η μέθοδος του «Άλματος» (“Jump” Method), η οποία προτείνεται από τους Sugar και James (2003) και βασίζεται στον υπολογισμό της στρέβλωσης (distortion), η οποία αποτελεί ένα μέτρο της διασποράς (dispersion) των παρατηρήσεων σε κάθε ομάδα. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, εφαρμόζεται επανειλημμένα η k -means CA, για διαφορετικό πλήθος ομάδων k κάθε φορά. Για κάθε εφαρμογή και εφόσον οι μεταβλητές που περιγράφουν την κάθε παρατήρηση είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους, υπολογίζεται η τιμή της στρέβλωσης d_k μέσω της εξίσωσης 2.8

$$d_k = \frac{1}{m} \min_{c_1, \dots, c_k} E[(X - c_x)^T \Gamma^{-1} (X - c_x)] \quad (2.8)$$

όπου m είναι το πλήθος των μεταβλητών που περιγράφουν την κάθε παρατήρηση, το X είναι μια m -διάστατη τυχαία παρατήρηση, το Γ είναι ο πίνακας των συνδιακυμάνσεων (covariance) των m μεταβλητών που περιγράφουν την κάθε παρατήρηση, τα $c_1, \dots, c_k$ είναι τα κέντρα των k ομάδων και c_x το πιο κοντινό κέντρο στην παρατήρηση X . Τότε η στρέβλωση είναι η μέση Mahalanobis απόσταση ανά διάσταση. Η απόσταση Mahalanobis είναι ένα μέτρο της απόστασης μεταξύ ενός σημείου και μιας κατανομής, που εισήχθη από τον P. C. Mahalanobis το 1936 (Sharma and Batra, 2014). Στην περίπτωση που οι m μεταβλητές είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους, ο πίνακας Γ είναι ο μοναδιαίος και η στρέβλωση d_k γίνεται ίση με τη μέση τετραγωνική ευκλείδεια απόσταση (ή μέσο τετραγωνικό σφάλμα), όπως φαίνεται στην εξίσωση 2.9.

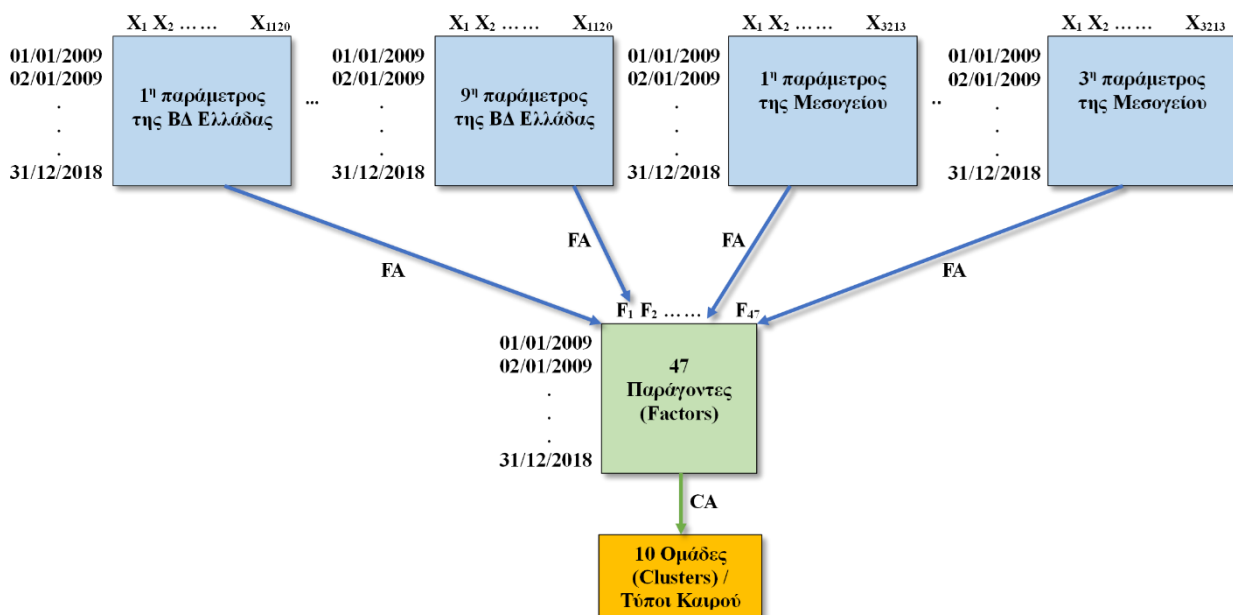
$$d_k = \frac{1}{m} \min_{c_1, \dots, c_k} E[(X - c_x)^2] \quad (2.9)$$

Μια απλοϊκή προσέγγιση για την επιλογή του πλήθους των συστάδων είναι η αναζήτηση εκείνου του σημείου της γραφικής αναπαράστασης της d_k ως προς τον αριθμό k , κατά το οποίο παύει να αλλάζει σημαντικά η κλίση της καμπύλης και γίνεται σχεδόν οριζόντια, όσο και να αυξάνει ο αριθμός k . Σε μια τέτοια καμπύλη, η οποία είναι πάντα μονότονα φθίνουσα, είναι αρκετά δύσκολο να αποφασιστεί το ακριβές σημείο στο οποίο η κλίση της καμπύλης γίνεται σχεδόν οριζόντια. Για τον λόγο αυτό προτείνεται ο μετασχηματισμός της καμπύλης της d_k με την ύψωση της σε μια αρνητική δύναμη. Αποδεικνύεται ότι η μετασχηματισμένη καμπύλη παρουσιάζει ένα άλμα στην τιμή του k , που αντιστοιχεί στο καταλληλότερο πλήθος των ομάδων, στις οποίες μπορούν να καταταχθούν οι παρατηρήσεις. Επιπλέον μετασχηματισμός της καμπύλης, με αφαίρεση μεταξύ τους των συνεχόμενων τιμών των μετασχηματισμένων d_k , για τον υπολογισμό αλμάτων, οδηγεί σε μια νέα καμπύλη, στην οποία η τιμή του k , για την οποία εμφανίζεται μέγιστη τιμή του άλματος, αποτελεί και το καταλληλότερο πλήθος ομάδων στις οποίες μπορούν να καταταγούν οι αρχικές παρατηρήσεις. Τα βήματα που ακολουθούνται στη μέθοδο αυτή είναι τα ακόλουθα: α) επαναλαμβανόμενη εφαρμογή της k -means CA, για διαφορετικό αριθμό ομάδων k κάθε φορά, β) υπολογισμός των στρεβλώσεων d_k για κάθε εφαρμογή της k -means CA, γ) επιλογή της δύναμης Y στην οποία θα υψωθεί η d_k για να μετασχηματιστεί, με τυπική τιμή του Y να αποτελεί το $Y=m/2$, όπου m είναι το πλήθος των μεταβλητών, δ) υπολογισμός αλμάτων στη μετασχηματισμένη στρέβλωση $J_k = d_k^{-Y} - d_{k-1}^{-Y}$, ε) στο διάγραμμα του J_k ως προς τον αριθμό των k ομάδων, η τιμή k για την οποία αντιστοιχεί η μεγαλύτερη τιμή του J_k αποτελεί το καταλληλότερο πλήθος των ομάδων οι οποίες υπάρχουν στα αρχικά δεδομένα και στις οποίες μπορούν να καταταγούν οι παρατηρήσεις.

2.2.3 Μεθοδολογία για τον ορισμό τύπων καιρού

Για τον ορισμό των τύπων καιρού (WTs) στην περίοδο μελέτης (01/01/2009 – 31/12/2018, 3652 ημέρες) εφαρμόζεται μια μεθοδολογία που περιλαμβάνει την FA σε συνδυασμό με την k -means CA, χρησιμοποιώντας μετεωρολογικά δεδομένα της βάσης δεδομένων ERA5 Reanalysis. Αρχικά, γίνεται εφαρμογή της FA στις χρονοσειρές των μετεωρολογικών παραμέτρων που εμφανίζονται στον Πίνακα 2.1, έτσι ώστε να μειωθεί ο μεγάλος αριθμός των αρχικών χρονοσειρών ο οποίος ισούται με 19719. Λόγω του μεγάλου πλήθους αρχικών χρονοσειρών, η εφαρμογή της FA εφαρμόζεται ξεχωριστά για κάθε μετεωρολογική παράμετρο. Για παράδειγμα, ο αριθμός των αρχικών χρονοσειρών που σχετίζονται με τη θερμοκρασία στα 2 μέτρα ισούται με το γινόμενο της χωρικής ανάλυσης της περιοχής με τη χρονική ανάλυση των δεδομένων ημερησίως. Έτσι στην αναφερόμενη περίπτωση, ο αριθμός των πλεγματικών σημείων της περιοχής (βλέπε Σχήμα 2.1β) που ισούται με $14 \times 16 = 224$ πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των ημερήσιων χρονικών σημείων της μεταβλητής που ισούται με 5, έτσι ώστε να προκύψει ο τελικός αριθμός των 1120 χρονοσειρών, πάνω στις οποίες εφαρμόζεται η FA. Να σημειωθεί ότι για τις μετεωρολογικές παραμέτρους που αφορούν την περιοχή της Μεσογείου (βλέπε Σχήμα 2.1α) προκύπτει ο αριθμός των 3213 χρονοσειρών (1071 πλεγματικά σημεία $\times$ 3 χρονικά σημεία), στις οποίες εφαρμόζεται η FA. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, εφαρμόζεται και η περιστροφή “varimax”, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθούν τα φορτία των παραγόντων που προκύπτουν. Ο αριθμός των παραγόντων επιλέχθηκε βάσει του κριτηρίου Scree και του ελέγχου της φυσικής υπόστασης των παραγόντων που προκύπτουν. Πιο συγκεκριμένα, όλοι οι παράγοντες που προκύπτουν από την FA κάθε φορά πρέπει να ερμηνεύουν τουλάχιστον το 1% των αρχικών μεταβλητών με φορτίο τουλάχιστον 0.70. Από την εφαρμογή της FA για όλες τις μετεωρολογικές παραμέτρους προκύπτουν συνολικά 47 μεταβλητές (παράγοντες), οι οποίες είναι ασυσχέτιστες

μεταξύ τους. Στη συνέχεια, γίνεται εφαρμογή της μεθόδου μη ιεραρχικής τεχνικής k-means CA, χρησιμοποιώντας τις 47 μεταβλητές που προκύπτουν από το προηγούμενο βήμα της μεθοδολογίας. Στο συγκεκριμένο βήμα της μεθοδολογίας, γίνεται εφαρμογή της k-means CA για έναν προκαθορισμένο αριθμό των ομάδων που πρέπει να διατηρηθούν, ο οποίος ξεκινάει από 2 και καταλήγει σε 20. Με την εφαρμογή της μεθόδου για κάθε αριθμό ομάδων, υπολογίζεται κάθε φορά και η τιμή της στρέβλωσης d_k , όπως επίσης και η μετασχηματισμένη στρέβλωση J_k , όπως ορίστηκαν προηγουμένως στη μέθοδο του «Άλματος». Οι τιμές που υπολογίζονται στο προηγούμενο βήμα της μεθόδου, χρησιμοποιούνται για τη γραφική απεικόνιση του J_k ως προς τον αριθμό των k ομάδων, η οποία χρησιμοποιείται συμβουλευτικά και για την επιλογή του τελικού αριθμού των ομάδων που πρέπει να διατηρηθούν. Ο αριθμός των ομάδων ισοδυναμεί με τον αριθμό των τύπων καιρού (WTs) που ορίζονται από την εφαρμογή της μεθοδολογίας. Στο Σχήμα 2.3 εμφανίζονται τα βήματα που εφαρμόζονται στη μεθοδολογία ορισμού των WTs.



Σχήμα 2.3. Σχηματική αναπαράσταση της πολυμεταβλητής στατιστικής μεθοδολογίας που εφαρμόζεται για τον ορισμό των τύπων καιρού.

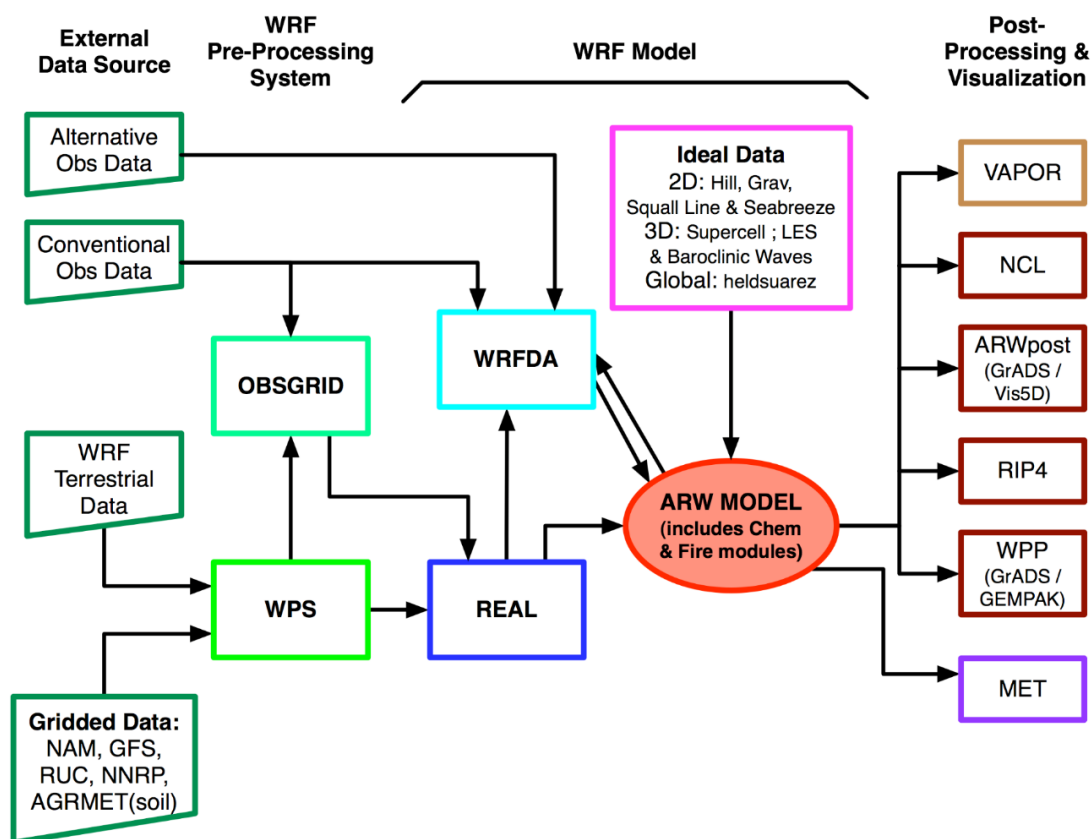
Με την ολοκλήρωση της μεθοδολογίας προσδιορισμού των WTs, κάθε ημέρα της περιόδου μελέτης αντιστοιχεί σε έναν συγκεκριμένο WT. Οι ημέρες που απαρτίζουν έναν WT έχουν μεταξύ τους κοινά χαρακτηριστικά, σε ότι αφορά τις τιμές και τη χωρική κατανομή των διαφόρων παραμέτρων στην περιοχή ενδιαφέροντος. Επίσης, για κάθε WT υπολογίζονται όλοι οι μέσοι χάρτες όλων των μετεωρολογικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται και για όλες τις χρονικές στιγμές. Οι μέσοι χάρτες μιας μετεωρολογικής παραμέτρου προκύπτουν από τις μέσες τιμές όλων των αντίστοιχων τιμών των ημερών ενός WT στα σημεία πλέγματος.

2.2.4 Μοντέλο Έρευνας και Πρόγνωσης Καιρού WRF

Το Μοντέλο Έρευνας και Πρόγνωσης Καιρού (Weather Research and Forecasting Model, WRF) είναι ένα προηγμένο σύστημα αριθμητικής πρόγνωσης καιρού μέσης κλίμακας, σχεδιασμένο τόσο για την ατμοσφαιρική έρευνα όσο και για τις εφαρμογές επιχειρησιακής πρόγνωσης. Διαθέτει δύο δυναμικούς πυρήνες, ένα σύστημα αφομοίωσης δεδομένων και μια αρχιτεκτονική λογισμικού

που υποστηρίζει παράλληλη επεξεργασία και επεκτασιμότητα συστήματος. Το μοντέλο εξυπηρετεί ένα ευρύ φάσμα μετεωρολογικών εφαρμογών σε κλίμακες από δεκάδες μέτρα έως χιλιάδες χιλιόμετρα. Η προσπάθεια ανάπτυξης του WRF ξεκινάει στα τέλη της δεκαετίας του 1990 και είναι μια συνεργατική σύμπραξη του Εθνικού Κέντρου Ατμοσφαιρικής Έρευνας (National Center for Atmospheric Research, NCAR), της Εθνικής Υπηρεσίας Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA), εκπροσωπούμενη από το Εθνικό Κέντρο Περιβαλλοντικής Πρόγνωσης (National Center for Environmental Protection, NCEP) και το Εργαστήριο Έρευνας του Συστήματος Γης (Earth System Research Laboratory, ESRL), της Πολεμικής Αεροπορίας των ΗΠΑ (U.S. Air Force), του Ερευνητικού Ναυτικού Εργαστηρίου (Naval Research Laboratory), του Πανεπιστημίου της Οκλαχόμα (University of Oklahoma) και της Ομοσπονδιακής Διοίκησης Αεροπορίας (Federal Aviation Administration, FAA). Το μοντέλο WRF, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, διαθέτει δυο δυναμικούς πυρήνες: τον πυρήνα Μη-υδροστατικό Μοντέλο Μέσης κλίμακας (Non-hydrostatic Mesoscale Model, NMM) (Janjic, 2003), ο οποίος αναπτύχθηκε από το NCEP, και τον πυρήνα Προχωρημένης Έρευνας WRF (Advance Research WRF, ARW) (Skamarock et al., 2005), ο οποίος αναπτύχθηκε από το NCAR. Κάθε δυναμικός πυρήνας αντιστοιχεί σε ένα σύνολο δυναμικών λύσεων που λειτουργούν σε μια συγκεκριμένη προβολή πλέγματος, διαμόρφωση πλέγματος και σύστημα κατακόρυφων συντεταγμένων. Για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής χρησιμοποιείται ο δυναμικός πυρήνας ARW, ο οποίος είναι κατάλληλος για χρήση σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και σε κλίμακες που κυμαίνονται από μέτρα έως χιλιάδες χιλιόμετρα. Μερικά παραδείγματα εφαρμογών του πυρήνα ARW είναι τα εξής: ιδεατές προσομοιώσεις (π.χ. μεταφοράς θερμότητας, βαροκλινικών κυμάτων), έρευνα παραμετροποιήσεων, έρευνα αφομοίωσης δεδομένων, έρευνα πρόγνωσης καιρού, πρόγνωση καιρού πραγματικού χρόνου. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται το μοντέλο WRF στην έκδοση 4.1.5, η οποία έχει αναβαθμιστεί στις 10 Μαρτίου 2020. Το λογισμικό του συστήματος μοντελοποίησης WRF βρίσκεται σε ιστοσελίδα με ελεύθερη πρόσβαση και για ελεύθερη χρήση από το κοινό.

Το διάγραμμα ροής του συστήματος μοντελοποίησης WRF απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4, που δείχνει την διάταξη των προγραμμάτων και τη ροή δεδομένων.



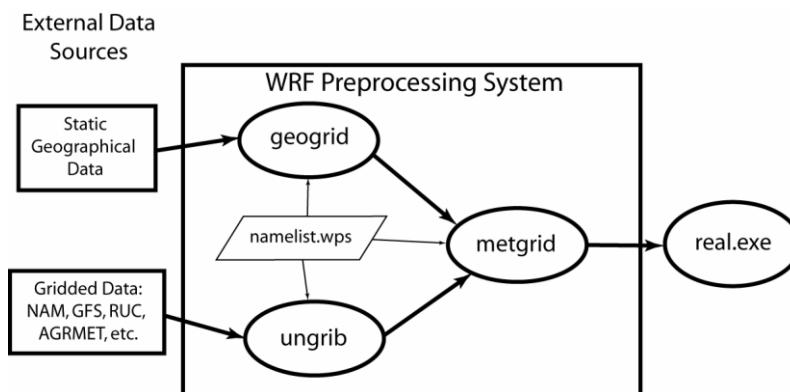
Σχήμα 2.4. Διάγραμμα ροής του μοντέλου WRF.

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4, μετεωρολογικά δεδομένα (επίγειες παρατηρήσεις, πλεγματικά δεδομένα κλπ.) και δεδομένα ξηράς από διάφορες εξωτερικές πηγές εισάγονται στο σύστημα μοντελοποίησης WRF, το οποίο αποτελείται από τρία κύρια μέρη. Το Σύστημα Προ-επεξεργασίας (WRF Pre-Processing System, WPS), το μοντέλο WRF που αποτελείται από τον δυναμικό πυρήνα ARW και τα προγράμματα μετα-επεξεργασίας – γραφικής απεικόνισης των αποτελεσμάτων.

2.2.4.1 Το Σύστημα Προ-επεξεργασίας του WRF (WPS)

Το Σύστημα Προ-επεξεργασίας WRF (WPS) είναι ένα σύνολο τριών προγραμμάτων, τα οποία συλλογικά προετοιμάζουν δεδομένα εισόδου για το πρόγραμμα real στις προσομοιώσεις με πραγματικά δεδομένα. Κάθε πρόγραμμα εκτελεί ένα στάδιο της προετοιμασίας: το geogrid ορίζει τα μοντέλα περιοχών και παρεμβάλει στατικά γεωγραφικά δεδομένα στα πλέγματα, το ungrib εξάγει μετεωρολογικά δεδομένα από αρχεία σε μορφή GRIB, και το metgrid παρεμβάλει οριζόντια τα μετεωρολογικά δεδομένα που εξήχθησαν από το ungrib στα πλέγματα του μοντέλου όπως ορίζονται από το πρόγραμμα geogrid. Η εργασία της παρεμβολής των μετεωρολογικών δεδομένων κατακόρυφα στα επίπεδα του μοντέλου WRF πραγματοποιείται εντός του προγράμματος real. Η ροή δεδομένων μεταξύ των προγραμμάτων του WPS φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Κάθε ένα από τα προγράμματα του WPS διαβάζει παραμέτρους από ένα κοινό αρχείο namelist, όπως φαίνεται στο σχήμα. Αυτό το αρχείο namelist περιέχει ξεχωριστές εγγραφές namelist για κάθε ένα από τα προγράμματα και μία κοινή εγγραφή namelist, η οποία ορίζει παραμέτρους που χρησιμοποιούνται από περισσότερα από ένα προγράμματα του WPS. Ο μηχανισμός δόμησης του WPS, ο οποίος είναι

παρόμοιος με τον μηχανισμό δόμησης που χρησιμοποιείται από το μοντέλο WRF, παρέχει επιλογές για τη μεταγλώττιση του WPS σε διάφορες πλατφόρμες.



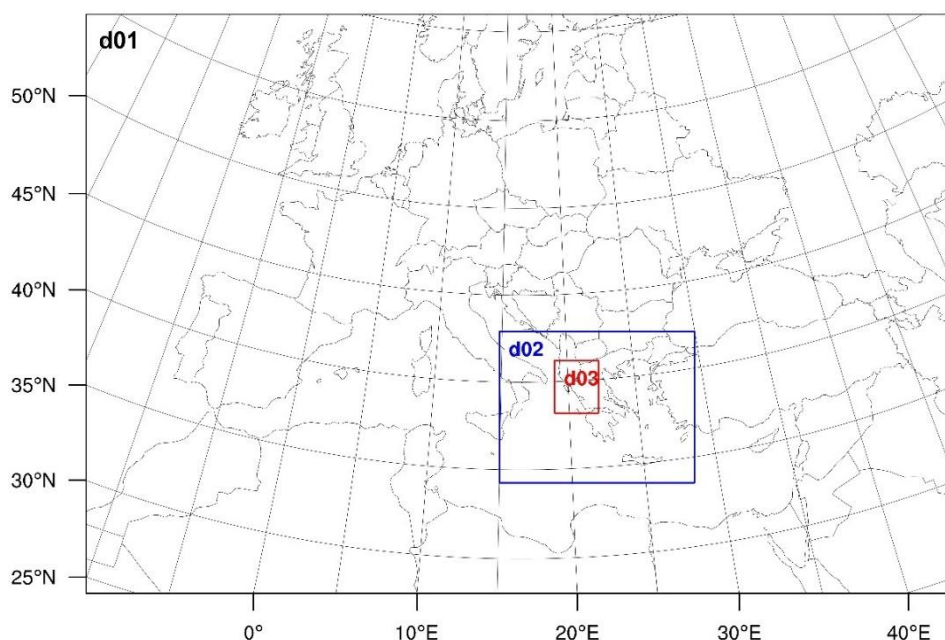
Σχήμα 2.5. Διάγραμμα ροής των προγραμμάτων του WPS.

Πιο αναλυτικά, ο σκοπός του geogrid είναι να ορίζει τις περιοχές προσομοίωσης ή πλέγματα (domains) και να παρεμβάλλει διάφορα σύνολα δεδομένων της ξηράς σε αυτές τις περιοχές του μοντέλου. Οι περιοχές προσομοίωσης ορίζονται χρησιμοποιώντας πληροφορίες που καθορίζει ο χρήστης στην εγγραφή "geogrid" του αρχείου namelist του WPS, το namelist.wps. Εκτός από τον υπολογισμό του γεωγραφικού πλάτους, του γεωγραφικού μήκους και των παραγόντων κλίμακας του χάρτη σε κάθε σημείο πλέγματος, το geogrid παρεμβάλλει κατηγορίες εδάφους, κατηγορίες χρήσης γης, ύψος εδάφους, μέση ετήσια θερμοκρασία εντός του εδάφους, μηνιαίο ποσοστό βλάστησης, μηνιαίες τιμές ανακλαστικότητας, μέγιστες τιμές ανακλαστικότητας χιονιού και κατηγορία κλίσης στα πλέγματα του μοντέλου. Τα εξαγόμενα αρχεία από την εκτέλεση του προγράμματος geogrid περιέχουν στατικά γεωγραφικά δεδομένα, δεδομένου ότι είναι αμετάβλητα κατά την πάροδο του χρόνου και για τον λόγο αυτό η εκτέλεση του προγράμματος geogrid γίνεται μια φορά κατά τον ορισμό των περιοχών προσομοίωσης. Τα παγκόσμια σύνολα δεδομένων που χρησιμοποιούνται για κάθε ένα από αυτά τα πεδία, παρέχονται μέσω της σελίδας λήψης του μοντέλου WRF. Ο τρόπος με τον οποίο το πρόγραμμα geogrid ορίζει τις περιοχές προσομοίωσης ονομάζεται εμφώλευση (nesting). Συνήθως αρχικά δημιουργείται μια περιοχή με πλέγμα αραιής χωρικής ανάλυσης η οποία ονομάζεται και μητρική περιοχή, μέσα στην οποία τοποθετείται ένα νέο πλέγμα πυκνότερης χωρικής ανάλυσης. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται τα λεπτομερή χαρακτηριστικά των τριών περιοχών προσομοίωσης όπως έχουν οριστεί για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής, για τις οποίες τηρείται η αναλογία 1:3 στις διαστάσεις πλέγματος μητρικής περιοχής με το πλέγμα υψηλότερης χωρικής ανάλυσης, ενώ στο Σχήμα 2.6 εμφανίζεται η γεωγραφική κατανομή των περιοχών αυτών. Για τη δημιουργία των περιοχών προσομοίωσης εφαρμόζεται μια από τις ακόλουθες διαθέσιμες προβολές α) σύμμορφη Lambert (Lambert conformal), β) πολική στερεογραφική (polar stereographic) και γ) Μερκατοριανή προβολή και υπολογίζεται ο συντελεστής κλίμακας χάρτη, ο οποίος εκφράζει την παραμόρφωση της προβολής ως προς τις πραγματικές αποστάσεις στην επιφάνεια της Γης, για όλα τα σημεία του πλέγματος. Στη παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται η σύμμορφη Lambert προβολή, η οποία επιλέγεται σε περιοχές μέσω των γεωγραφικών πλατών, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η μέγιστη παραμόρφωση μέσα στην περιοχή που καλύπτεται από τα πλέγματα του μοντέλου.

Πίνακας 2.3. Λεπτομερή χαρακτηριστικά περιοχών προσομοίωσης από το μοντέλο WRF

	<i>d01</i>	<i>d02</i>	<i>d03</i>
Οριζόντια χωρική ανάλυση πλέγματος (km)	18	6	2
Αριθμός σημείων πλέγματος στη διεύθυνση <i>i</i> (<i>A-A</i>)	300	202	136
Αριθμός σημείων πλέγματος στη διεύθυνση <i>j</i> (<i>N-B</i>)	200	157	163
Θέση <i>i</i> του σημείου (1,1) της υποπεριοχής στη μητρική περιοχή	-	143	58
Θέση <i>j</i> του σημείου (1,1) της υποπεριοχής στη μητρική περιοχή	-	39	73

Για τις κατηγορίες χρήσης γης στις περιοχές προσομοίωσης, επιλέγεται η ταξινόμηση IGBP-Modified MODIS, η οποία περιλαμβάνει 21 κατηγορίες χρήσης γης και αποτελεί μια τροποποιημένη εκδοχή της ταξινόμησης χρήσης γης MODIS (Broxton et al., 2014). Κάθε μια κατηγορία χρήσης γης έχει συγκεκριμένες ιδιότητες, όπως αεροδυναμικό μήκος τραχύτητας, ποσοστό ανακλαστικότητας κλπ. τα οποία παίζουν ρόλο σε συγκεκριμένες διαδικασίες κατά την αριθμητική πρόγνωση καιρού. Η περιγραφή χρήσης γης για κάθε κατηγορία χρήσης γης της ταξινόμησης IGBP-Modified MODIS παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.4.

**Σχήμα 2.6.** Γεωγραφικές περιοχές προσομοίωσης (*d01*, *d02* και *d03*) από το μοντέλο WRF.**Πίνακας 2.4.** Ταξινόμηση IGBP-Modified MODIS 21 κατηγοριών χρήσης γης.

Κατηγορία Χρήσης Γης	Περιγραφή Χρήσης Γης	Κατηγορία Χρήσης Γης	Περιγραφή Χρήσης Γης
1	Δάσος Αειθαλών Κωνοφόρων	12	Καλλιεργήσιμες Εκτάσεις
2	Δάσος Αειθαλών Πλατύφυλλων	13	Αστικές και Δομημένες Περιοχές
3	Δάσος Φυλλοβόλων Κωνοφόρων	14	Μωσαϊκό Καλλιεργήσιμων και Φυσικής Βλάστησης
4	Δάσος Φυλλοβόλων Πλατύφυλλων	15	Χιόνι και Πάγος
5	Μικτά Δάση	16	Άγονες ή Αραιά Φυτεμένες Εκτάσεις
6	Κλειστές Θαμνώδεις Εκτάσεις	17	Νερό
7	Ανοιχτές Θαμνώδεις Εκτάσεις	18	Δασώδης Τούνδρα
8	Ξυλώδεις Σαβάνες	19	Μικτή Τούνδρα
9	Σαβάνες	20	Άγονη Τούνδρα
10	Λιβάδια	21	Λίμνες
11	Μόνιμοι Υγρότοποι		

Το πρόγραμμα ungrib διαβάζει αρχεία με μορφότυπο GRIB (GRIB1 ή GRIB2), αποκωδικοποιεί τα δεδομένα και γράφει τα δεδομένα σε μια απλή μορφή που ονομάζεται ενδιάμεση μορφή. Τα αρχεία GRIB περιέχουν μετεωρολογικά δεδομένα τα οποία είναι μεταβλητά με τον χρόνο και προέρχονται συνήθως από άλλα περιοχικά ή παγκόσμια μοντέλα, όπως δεδομένα του μοντέλου GFS που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή. Τα αρχεία με μορφότυπο GRIB περιέχουν συνήθως περισσότερα πεδία από όσα είναι απαραίτητα για την αρχικοποίηση του μοντέλου WRF. Και οι δύο εκδόσεις του μορφότυπου GRIB χρησιμοποιούν διάφορους κωδικούς για την αναγνώριση των μεταβλητών και των επιπέδων που περιέχονται στα αρχεία GRIB. Το ungrib χρησιμοποιεί πίνακες αυτών των κωδικών, που ονομάζονται Vtables (Variable tables), για να ορίσει ποια πεδία θα εξαχθούν από τα αρχεία GRIB και θα γραφτούν στην ενδιάμεση μορφή. Οι πίνακες Vtables παρέχονται με το λογισμικό ungrib, για τα ευρέως χρησιμοποιούμενα μετεωρολογικά δεδομένα με μορφότυπο GRIB.

Το πρόγραμμα metgrid παρεμβάλει οριζόντια τα μετεωρολογικά δεδομένα που προκύπτουν από την εκτέλεση του προγράμματος ungrib πάνω στις περιοχές προσομοίωσης του μοντέλου, που προκύπτουν από την εκτέλεση του προγράμματος geogrid. Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του προγράμματος metgrid εισάγονται στη συνέχεια στο πρόγραμμα real του WRF, έτσι ώστε να γίνει και η αρχικοποίηση του μοντέλου WRF. Το εύρος των ημερομηνιών των δεδομένων που πρόκειται να παρεμβληθούν από το πρόγραμμα metgrid ορίζεται στην εγγραφή “share” του αρχείου namelist του WPS και τα εύρη ημερομηνιών πρέπει να καθορίζονται ξεχωριστά στο namelist για κάθε περιοχή προσομοίωσης. Δεδομένου του ότι η εργασία του προγράμματος metgrid, όπως και του προγράμματος ungrib, εξαρτάται από τον χρόνο, το metgrid εκτελείται κάθε φορά που αρχικοποιείται μια νέα προσομοίωση. Τα εξαγόμενα αρχεία των προγραμμάτων του WPS γράφονται σε μορφότυπο WRF I/O API, ενώ μπορεί να επιλεγθεί και ο μορφότυπος NetCDF, για εύκολη οπτικοποίηση των δεδομένων με τη χρήση εξωτερικών πακέτων λογισμικού, όπως τα ncview, NCL και RIP4.

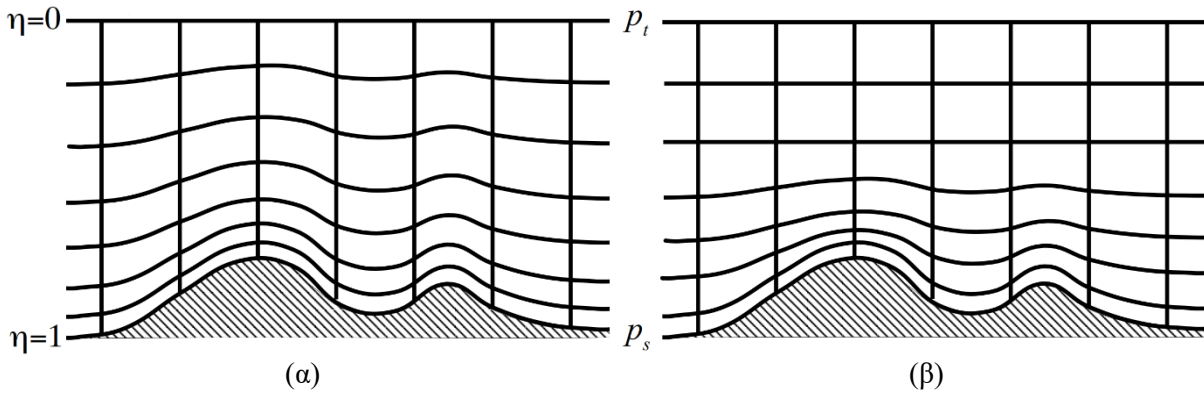
2.2.4.2 Το μοντέλο WRF με δυναμικό επιλυτή ARW

Το μοντέλο WRF είναι ένα πλήρως συμπίεστο και μη υδροστατικό μοντέλο (με δυνατότητα επιλογής υδροστατικής κατά τον χρόνο εκτέλεσης). Η κατακόρυφη συντεταγμένη του, η οποία επιλέγεται από τον χρήστη α) ως συντεταγμένη που ακολουθεί το ανάγλυφο (terrain-following, TF) είτε β) ως υβριδική κατακόρυφη συντεταγμένη υδροστατικής πίεσης (hybrid vertical coordinate, HVC). Η διάταξη του πλέγματος είναι του τύπου C Arakawa (Arakawa and Lamb, 1977). Το μοντέλο χρησιμοποιεί τα σχήματα ολοκλήρωσης χρόνου 2ης και 3ης τάξης Runge-Kutta και σχήματα οριζόντιας μεταφοράς από 2ης έως 6ης τάξης τόσο στον οριζόντιο όσο και στον κατακόρυφο άξονα. Ο κώδικας του μοντέλου WRF με δυναμικό πυρήνα ARW περιλαμβάνει ένα πρόγραμμα αρχικοποίησης το οποίο για πραγματικά δεδομένα είναι το real.exe, ενώ για δεδομένα προσομοίωσης το ideal.exe, ένα πρόγραμμα αριθμητικής ολοκλήρωσης το wrf.exe, ένα πρόγραμμα για μονόδρομη εμφώλευση το ndown.exe και ένα πρόγραμμα για την εισαγωγή ψευδούς τροπικής καταιγίδας το tc.exe.

Οι εξισώσεις του ARW διατυπώνονται χρησιμοποιώντας μια κατακόρυφη συντεταγμένη υδροστατικής πίεσης που ακολουθεί το ανάγλυφο, η οποία συμβολίζεται με η και αναφέρεται επίσης ως κατακόρυφη συντεταγμένη μάζας. Στις προηγούμενες εκδόσεις του ARW η η ορίζεται ως εξής:

$$\eta = \frac{p_d - p_t}{p_s - p_t} \quad (2.10)$$

όπου το p_d είναι η υδροστατική συνιστώσα της πίεσης του ξηρού αέρα και το p_s και το p_t είναι οι τιμές της πίεσης κατά μήκος της οριακής επιφάνειας της επιφάνειας του εδάφους και της κορυφής του μοντέλου αντίστοιχα. Ο ορισμός της κατακόρυφης συντεταγμένης (Εξίσωση 2.10), που προτείνεται από τον Laprise (Laprise, 1992) για χρήση με τις μη υδροστατικές εξισώσεις, είναι η παραδοσιακή συντεταγμένη σίγμα (συντεταγμένη που ακολουθεί το ανάγλυφο) που χρησιμοποιείται σε πολλά υδροστατικά ατμοσφαιρικά μοντέλα. Η συντεταγμένη η κυμαίνεται από τιμή 1 στην επιφάνεια έως 0 στο ανώτερο όριο του μοντέλου (Σχήμα 2.7α). Στην τρέχουσα έκδοση του ARW που χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή, η κατακόρυφη συντεταγμένη έχει γενικευτεί ώστε να επιτρέπει την ταχύτερη εξάλειψη της επιρροής του ανάγλυφου στις επιφάνειες της κατακόρυφης συντεταγμένης με την αύξηση του ύψους πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7β.



Σχήμα 2.7. Η κατακόρυφη συντεταγμένη η του ARW στη μορφή α) TF και β) HVC.

Για αυτήν την τροποποιημένη κατακόρυφη συντεταγμένη, χρησιμοποιείται μια υβριδική κατακόρυφη συντεταγμένη σίγμα – πίεσης όπως περιγράφεται από τους Park et al. (2013) και έχει την ακόλουθη μορφή:

$$p_d = B(\eta)(p_s - p_t) + [\eta - B(\eta)](p_0 - p_t) + p_t \quad (2.11)$$

όπου το p_0 είναι η πίεση αναφοράς στο επίπεδο της θάλασσας. Σε αυτή την εξίσωση η $B(\eta)$ είναι μια συνάρτηση που ορίζει τη σχετική στάθμιση ανάμεσα στη συντεταγμένη σίγμα, που ακολουθεί το ανάγλυφο και μιας καθαρής συντεταγμένης πίεσης, έτσι ώστε η κατακόρυφη συντεταγμένη η να αντιστοιχεί στη συντεταγμένη σίγμα (Εξίσωση 2.10) για $B(\eta) = \eta$ και να επανέρχεται σε μια υδροστατική κατακόρυφη συντεταγμένη πίεσης για $B(\eta) = 0$. Για την πραγματοποίηση της ομαλής μετάβασης από τη συντεταγμένη σίγμα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους στη συντεταγμένη πίεσης στα ανώτερα επίπεδα του μοντέλου, η συνάρτηση $B(\eta)$ ορίζεται από ένα πολυώνυμο τρίτου βαθμού της μορφής: $B(\eta) = c_1 + c_2\eta + c_3\eta^2 + c_4\eta^3$. Ο τρόπος με τον οποίο ορίζονται τα κατακόρυφα επίπεδα του μοντέλου καθορίζεται από τον χρήστη μέσω του αρχείου ορισμού παραμέτρων του μοντέλου, namelist. Ο χρήστης είναι ελεύθερος να καθορίσει τις τιμές η των κατακόρυφων επιπέδων του μοντέλου υπό τον περιορισμό ότι $\eta = 1$ στην επιφάνεια, $\eta = 0$ στην κορυφή του μοντέλου και η η μειώνεται μονοτονικά μεταξύ της επιφάνειας και της κορυφής του μοντέλου. Ο αριθμός των κατακόρυφων επιπέδων που έχουν οριστεί στην παρούσα διατριβή είναι 40 επίπεδα. Η μετρική της κατακόρυφης συντεταγμένης ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\mu_d = \frac{\partial p_d}{\partial \eta} = B_\eta(\eta)(p_s - p_t) + [1 - B_\eta(\eta)](p_0 - p_t) \quad (2.12)$$

Εφόσον το $\mu_d \Delta \eta = \Delta p_d = -g \rho_d \Delta z$ είναι ανάλογο με τη μάζα ανά μονάδα επιφάνειας εντός ενός κελιού πλέγματος, οι κατάλληλες μορφές ροής για τις προγνωστικές μεταβλητές ορίζονται ως εξής:

$$\mathbf{V} = \mu_d \mathbf{v} = (U, V, W), \quad \Omega = \mu_d \omega, \quad \theta_m = \mu_d \theta_m, \quad Q_m = \mu_d q_m \quad (2.13)$$

όπου, $\mathbf{v} = (u, v, w)$ είναι οι συναρτησιακές (συμμεταβλητές) ταχύτητες στις οριζόντιες και κατακόρυφες διευθύνσεις, ενώ $\omega = \dot{\eta}$ είναι η αντίθετη «κατακόρυφη» ταχύτητα. Η $\theta_m = \theta(1 + (R_v/R_d)q_v) \approx \theta(1 + 1.61q_v)$ είναι η δυναμική θερμοκρασία του υγρού αέρα και η $Q_m = \mu_d q_m$, όπου $q_m = q_v, q_c, q_r, \dots$ αντιπροσωπεύει την αναλογία μίγματος των μεταβλητών υγρασίας (υδρατμός, ύδωρ νέφους, ύδωρ βροχής, κλπ., ανάλογα το σχήμα μικροφυσικής που χρησιμοποιείται). Παρόλο που το γεωδυναμικό $\varphi = gz$ είναι επίσης προγνωστική μεταβλητή στις διαφορικές εξισώσεις του ARW δε γράφεται σε μορφή ροής καθώς ο όρος $\mu_d \varphi$ δεν είναι διατηρούμενη ποσότητα.

Ο δυναμικός επιλυτής ARW ενσωματώνει τις συμπιεστές, μη υδροστατικές εξισώσεις Euler. Οι διαφορικές εξισώσεις διατυπώνονται σε μορφή ροής χρησιμοποιώντας μεταβλητές που έχουν τις ιδιότητες διατήρησης, ακολουθώντας τη φιλοσοφία του Ooyama (1990). Οι εξισώσεις αυτές διατυπώνονται χρησιμοποιώντας την υδροστατική πίεση ως μια ανεξάρτητη μεταβλητή (Laprise, 1992). Λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβλητές που ορίζονται προηγουμένως (Εξισώσεις 2.12 και 2.13) οι διαφορικές εξισώσεις Euler σε μορφή ροών που επιλύονται από το μοντέλο γράφονται ως εξής:

$$F_U = \partial_t U + (\nabla \cdot \mathbf{V}u) + \mu_d \alpha \partial_x p + (\alpha/\alpha_d) \partial_{\eta} p \partial_x \varphi \quad (2.14)$$

$$F_V = \partial_t V + (\nabla \cdot \mathbf{V}v) + \mu_d \alpha \partial_y p + (\alpha/\alpha_d) \partial_{\eta} p \partial_y \varphi \quad (2.15)$$

$$F_W = \partial_t W + (\nabla \cdot \mathbf{V}w) - g[(\alpha/\alpha_d) \partial_{\eta} p - \mu_d] \quad (2.16)$$

$$F_{\theta_m} = \partial_t \theta_m + (\nabla \cdot \mathbf{V}\theta_m) \quad (2.17)$$

$$0 = \partial_t \mu_d + (\nabla \cdot \mathbf{V}) \quad (2.18)$$

$$0 = \partial_t \varphi + \mu_d^{-1}[(\mathbf{V} \cdot \nabla \varphi) - gW] \quad (2.19)$$

$$F_{Q_m} = \partial_t Q_m + (\nabla \cdot \mathbf{V}Q_m) \quad (2.20)$$

με τη διαγνωστική εξίσωση για την υδροστατική πίεση του ξηρού αέρα

$$\partial_{\eta} \varphi = -\alpha_d \mu_d \quad (2.21)$$

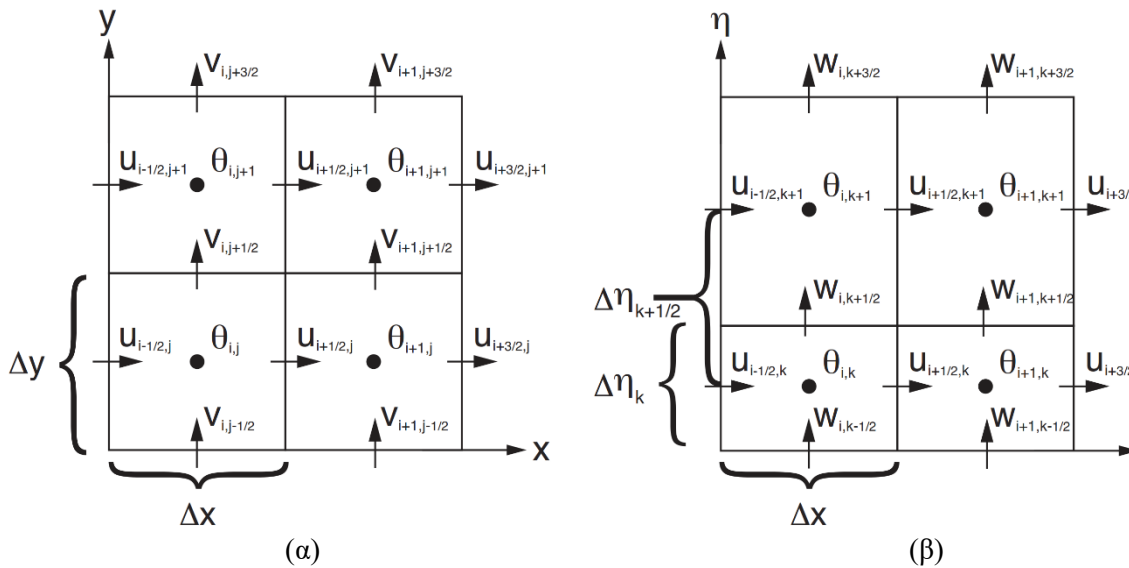
και τη διαγνωστική σχέση της συνολικής πίεσης (ξηρού αέρα και υδρατμών)

$$p = p_0 (R_d \theta_m / p_0 \alpha_d)^{\gamma} \quad (2.22)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις ο όρος α_d είναι ο ειδικός όγκος ξηρού αέρα ($1/\rho_d$) και α είναι ο ειδικός όγκος λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητα των στοιχείων σε ολόκληρο το στρώμα μελέτης $\alpha = \alpha_d (1 + q_v + q_c + q_r + q_i + \dots)^{-1}$. Στις εξισώσεις 2.14 έως 2.20, οι δείκτες x, y και η δηλώνουν παραγωγή, με τους όρους απόκλισης να αναλύονται ως εξής: $\nabla \cdot \mathbf{V}a = \partial_x(Ua) + \partial_y(Va) + \partial_{\eta}(\Omega a)$ και $\mathbf{V} \cdot \nabla a = U \partial_x a + V \partial_y a + \Omega \partial_{\eta} a$, όπου το a αντιπροσωπεύει μια γενική μεταβλητή. Το $\gamma = c_p/c_v = 1.4$ είναι η αναλογία των θερμοχωρητικοτήτων υπό σταθερή πίεση και σταθερό όγκο του ξηρού αέρα, R_d είναι η σταθερά αερίου για τον ξηρό αέρα και p_0 είναι η επιφανειακή πίεση αναφοράς (συνήθως 10^5 Pascals). Οι όροι $F_U, F_V, F_W, F_{\theta_m}$ αντιπροσωπεύουν όρους εξαναγκασμού (δυνάμεων) που προκύπτουν από τη φυσική του μοντέλου, την τυρβώδη ανάμειξη, τις σφαιρικές προβολές και την περιστροφή της γης.

Στο Σχήμα 2.8 εμφανίζονται οι θέσεις στις οποίες υπολογίζονται οι μετεωρολογικές παράμετροι στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο πλέγμα του μοντέλου ARW. Ποιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8 οι συνιστώσες της ταχύτητας (u, v , και w) είναι μετατοπισμένες κατά μισό μήκος στοιχείου πλέγματος από τις θερμοδυναμικές μεταβλητές. Οι δείκτες των μεταβλητών (i, j, k) υποδεικνύουν τις θέσεις των μεταβλητών με $(x, y, \eta) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta \eta)$. Για τον υπολογισμό των μετεωρολογικών μεταβλητών στο πλέγμα του μοντέλου, σημειώνουμε τα σημεία όπου βρίσκεται η μεταβλητή θ (θερμοδυναμικές μεταβλητές) ως σημεία μάζας και ομοίως σημειώνουμε τις θέσεις όπου οι u, v , και w ορίζονται ως σημεία u , σημεία v και σημεία w , αντίστοιχα. Να σημειωθεί ότι οι

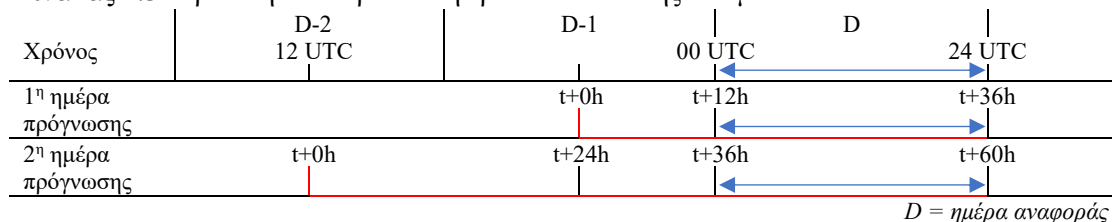
μεταβλητές υγρασίας q_i ορίζονται στα σημεία μάζας και το γεωδυναμικό ύψος φ στα σημεία w . Επίσης οι διαγνωστικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο, η πίεση p και ο ειδικός όγκος α υπολογίζονται στα σημεία μάζας. Τα μήκη πλέγματος Δx και Δy είναι σταθερά από τη διατύπωση του μοντέλου. Οι αλλαγές στα φυσικά μήκη του πλέγματος, που σχετίζονται με τις διάφορες προβολές πάνω στην επιφάνεια της Γης (αναφέρονται προηγουμένως), λαμβάνονται υπόψη οι συντελεστές κλίμακας χάρτη (map factors), όπως ορίζονται στο WPS. Το κατακόρυφο μήκος του πλέγματος $\Delta \eta$ δεν είναι σταθερό, αλλά καθορίζεται στην αρχικοποίηση του μοντέλου όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Χρησιμοποιώντας αυτούς τους ορισμούς πλέγματος και μεταβλητών, μπορούμε να ορίσουμε τη χωρική διακριτοποίηση για τον επιλυτή ARW.



Σχήμα 2.8. Το α) οριζόντιο και β) κατακόρυφο πλέγμα του μοντέλου ARW

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.5, το μοντέλο WRF αρχικοποιείται με μετεωρολογικά δεδομένα πρόγνωσης του μοντέλου GFS στις 12 UTC για 36 και 60 ώρες πρόγνωσης για την απόκτηση μετεωρολογικών δεδομένων πρώτης ($t+12h$ έως $t+36h$) και δεύτερης ημέρας πρόγνωσης ($t+36h$ έως $t+60h$), θεωρώντας τις πρώτες 12 ώρες πρόγνωσης ως spin-up του μοντέλου (χρονικό διάστημα μετά το οποίο επέρχεται δυναμική ισορροπία στις περιοχές πρόγνωσης). Χρησιμοποιείται η τεχνική της μονόδρομης εμφώλευσης μεταξύ των τριών περιοχών εκτέλεσης του μοντέλου (βλέπε Σχήμα 2.6), που σημαίνει ότι η εκτέλεση του μοντέλου γίνεται ανεξάρτητα σε κάθε περιοχή προσομοίωσης, δηλαδή πρώτα εκτελείται το μοντέλο WRF στην περιοχή της Ευρώπης η οποία με την ολοκλήρωση της πρόγνωσης της παρέχει μετεωρολογικά δεδομένα υψηλότερης χωρικής και χρονικής ανάλυσης για την αρχικοποίηση και πρόγνωση στην περιοχή της Ελλάδας, η οποία με τη σειρά της παρέχει μετεωρολογικά δεδομένα υψηλότερης χωρικής ανάλυσης για την αρχικοποίηση και πρόγνωση στην περιοχή της ΒΔ Ελλάδας. Οι ημέρες για τις οποίες εκτελείται το μοντέλο ορίζονται από την ταξινόμηση WTs, που έχει πραγματοποιηθεί σε προηγούμενο βήμα. Δεδομένου του ότι δεν είναι δυνατό να εκτελεστεί το μοντέλο WRF για όλες της ημέρες της περιόδου μελέτης των 10 ετών (πολύ χρονοβόρα διαδικασία), χρησιμοποιούνται ως ημέρες αναφοράς οι 64 πλησιέστερες ημέρες στο κέντρο κάθε συστάδας σε κάθε WT για τις οποίες θα εκτελεστεί το μοντέλο, οι οποίες είναι και οι πιο αντιπροσωπευτικές για κάθε WT. Ο αριθμός των 64 ημερών έχει προκύψει ως το 10% των ημερών του WT με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης στην περίοδο μελέτης των 10 ετών και εφαρμόζεται στην εκτέλεση του μοντέλου WRF για τη διαδικασία επικύρωσης και επαλήθευσης του.

Πίνακας 2.5. Χρονική αναπαράσταση τρόπου εκτέλεσης του μοντέλου WRF.



2.2.4.3 Φυσικές παραμετροποιήσεις του μοντέλου WRF

Το μοντέλο WRF προσφέρει πολλαπλές επιλογές φυσικών παραμετροποιήσεων οι οποίες μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους. Οι επιλογές αυτές γενικά μπορούν να είναι από απλές και αποτελεσματικές μέχρι εξεζητημένες και υπολογιστικά κοστοβόρες. Οι κύριες φυσικές παραμετροποιήσεις του μοντέλου αφορούν, τη μικροφυσική (φυσική νεφών, microphysics), την ανωμεταφορά (φυσική δημιουργίας σωρειτόμορφων νεφών, cumulus parameterization), τις ακτινοβολίες μακρών (longwave radiation) και βραχέων κυμάτων (shortwave radiation), το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (PBL physics), το επιφανειακό στρώμα αέρος και την αλληλεπίδραση με το έδαφος (surface layer parameterization) και την επιφάνεια του εδάφους (land surface parameterization). Στον Πίνακα 2.6 εμφανίζονται οι κύριες επιλεγμένες παραμετροποιήσεις φυσικών διεργασιών του μοντέλου WRF που χρησιμοποιούνται για την επικύρωση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων πρόγνωσης. Να σημειωθεί ότι οι αναφερόμενες παραμετροποιήσεις εφαρμόζονται και στις τρεις περιοχές εκτέλεσης του μοντέλου WRF εκτός της παραμετροποίησης ανωμεταφοράς που απενεργοποιείται στην περιοχή της ΒΔ Ελλάδος, η οποία έχει οριζόντια χωρική ανάλυση 2 km. Η επιλογή αυτή έγινε γιατί η παραμετροποίηση ανωμεταφοράς είναι θεωρητικά έγκυρη σε αραιότερα μεγέθη πλέγματος (π.χ. ≥ 10 km), όπου είναι απαραίτητα για την ορθή απελευθέρωση της δυνητικά διαθέσιμης ενέργειας ανωμεταφοράς (convective available potential energy) σε μια πραγματική χρονική κλίμακα στις στήλες του πλέγματος ανωμεταφοράς. Γενικά δεν πρέπει να ενεργοποιείται η παραμετροποίηση ανωμεταφοράς όταν το μοντέλο μπορεί να επιλύσει από μόνο του τις βαθιές ροές ανωμεταφοράς (deep convective updrafts) σε πλέγματα με πυκνή οριζόντια χωρική ανάλυση π.χ. ≤ 4 km (Skamarock et al., 2019).

Πίνακας 2.6. Προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις βασικών φυσικών διεργασιών του μοντέλου WRF.

Παραμετροποίηση	Ονομασία σχήματος στο WRF	Τεκμηρίωση
Microphysics (mp_physics)	Thompson (8)	Thompson et al., 2008
Cumulus parameterization (cu_physics)	Tiedtke (6)	Tiedtke, 1989; Zhang et al., 2011
Longwave Radiation (ra_lw_physics)	RRTMG (4)	Iacono et al., 2008
Shortwave Radiation (ra_sw_physics)	RRTMG (4)	Iacono et al., 2008
PBL Physics (bl_pbl_physics)	MYJ (2)	Janjić, 1994
Land Surface (sf_surface_physics)	Noah (2)	Chen and Dudhia, 2001
Surface Layer (sf_sfclay_physics)	Monin-Obukhov (Janjic Eta) (2)	Janjić, 1996; Janjić, 2001

Οι επιλογές των αναφερόμενων παραμετροποιήσεων αποτελούν τις τρέχουσες προτεινόμενες προεπιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις του μοντέλου (Wang et al., 2017) όπως έχουν προκύψει από μελέτη της εκτέλεσης του μοντέλου WRF για πρόγνωση καιρού σε πραγματικό χρόνο για την

ευρύτερη περιοχή των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής σε συνθήκες που ευνοείται και η δημιουργία νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης.

Για τον σκοπό βελτίωσης των αποτελεσμάτων πρόγνωσης, όπως προκύπτει από την επικύρωση και επαλήθευση της πρόγνωσης που βασίζεται στις επιλογές του Πίνακα 2.6, είναι απαραίτητη η αλλαγή κάποιων φυσικών παραμετροποιήσεων που σχετίζονται με τη μετεωρολογική παράμετρο που εξετάζεται κάθε φορά. Για παράδειγμα, οι τιμές πρόγνωσης του υετού επηρεάζονται κυρίως από τις παραμετροποιήσεις μικροφυσικής και ανωμεταφοράς, ενώ οι τιμές πρόγνωσης θερμοκρασίας αέρα στα 2 μέτρα από την επιφάνεια της Γης επηρεάζονται κυρίως από τις παραμετροποιήσεις του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος σε συνδυασμό με το επιφανειακό στρώμα αέρος, της επιφάνειας του εδάφους και των ακτινοβολιών. Στους Πίνακες 2.7, 2.8 και 2.9 παρουσιάζονται διάφορες φυσικές παραμετροποιήσεις που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων πρόγνωσης. Οι αναφερόμενες φυσικές παραμετροποιήσεις που χρησιμοποιούνται για αυτό τον σκοπό αποτελούν αντικαταστάσεις των προεπιλεγμένων παραμετροποιήσεων του Πίνακα 2.5. Για παράδειγμα, με την επιλογή της παραμετροποίησης με κωδικοποίηση `pbl3 sfclay3`, η προεπιλεγμένη παραμετροποίηση του ΑΟΣ (επιλογή `bl_pbl_physics=2`) αντικαθίσταται από την επιλογή `bl_pbl_physics=3` και ταυτόχρονα η προεπιλεγμένη παραμετροποίηση επιφανειακού στρώματος (επιλογή `sf_sfclay_physics=2`) αντικαθίσταται από την επιλογή `sf_sfclay_physics=3`. Επίσης, με την επιλογή της παραμετροποίησης με κωδικοποίηση `cu01`, η προεπιλεγμένη παραμετροποίηση ανωμεταφοράς (επιλογή `cu_physics=6`) αντικαθίσταται από την επιλογή `cu_physics=1`.

Πίνακας 2.7. Συνδυασμοί παραμετροποιήσεων ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (PBL Physics) και επιφανειακού στρώματος αέρος με την αλληλεπίδραση με το έδαφος (Surface Layer) που χρησιμοποιούνται για μελέτη βελτίωσης πρόγνωσης τιμών θερμοκρασίας.

Κωδικοποίηση παραμετροποίησης	Παραμετροποίηση PBL σχήματος στο WRF (αριθμός επιλογής <code>bl_pbl_physics</code>)	Παραμετροποίηση Surface Layer σχήματος στο WRF (αριθμός επιλογής <code>sf_sfclay_physics</code>)
pbl1 sfclay91	YSU scheme (1) (Hong et al., 2006)	Old MM5 scheme (91) (Fairall et al., 2003)
pbl3 sfclay3	Hybrid EDMF GFS scheme (3) (Han et al., 2016)	NCEP Global Forecast System scheme (3)
pbl7 sfclay91	ACM2 (Pleim) PBL (ARW) (7) (Pleim, 2007)	Old MM5 scheme (91)
pbl9 sfclay91	UW boundary layer scheme from CAM5 (CESM 1_0_1) (9) (Bretherton and Park, 2009)	Old MM5 scheme (91)
pbl12 sfclay91	Grenier-Bretherton-McCaa scheme (12) (Grenier and Bretherton, 2001)	Old MM5 scheme (91)
pbl99 sfclay91	MRF scheme (99) (Hong and Pan, 1996)	Old MM5 scheme (91)

Πίνακας 2.8. Παραμετροποιήσεις ανωμεταφοράς (cumulus parameterization) που χρησιμοποιούνται για μελέτη βελτίωσης πρόγνωσης νετού.

Κωδικοποίηση παραμετροποίησης	Παραμετροποίηση cumulus σχήματος στο WRF (αριθμός επιλογής cu_physics)
cu01	Kain-Fritsch (new Eta) scheme (1) (Kain, 2004)
cu02	Betts-Miller-Janjic scheme (2) (Janjić, 1994; Janjić, 2000)
cu03	Grell-Freitas ensemble scheme (3) (Grell and Freitas, 2014)
cu05	Grell 3D ensemble scheme (5) (Grell, 1993)
cu07	Zhang-McFarlane scheme from CAM5 (CESM 1 0 1) (7) (Zhang and McFarlane, 1995)
cu10	Modified Kain-Fritsch scheme with trigger function based on PDFs (10) (Berg et al., 2013)
cu11	Multi-scale Kain-Fritsch scheme (11) (Zheng et al., 2016)
cu14	KIM Simplified Arakawa-Schubert scheme (KSAS) across gray-zone resolutions (14) (Han et al., 2020)
cu16	A newer Tiedtke scheme (16) (Zhang and Wang, 2017; Bechtold et al., 2004; 2008; 2014)
cu93	Grell-Devenyi ensemble scheme (93) (Grell and Dévényi, 2002)
cu94	2015 GFS Simplified Arakawa-Schubert scheme (HWRF) (94)
cu95	Previous GFS Simplified Arakawa-Schubert scheme (HWRF) (95) (Han and Pan, 2011)
cu99	previous Kain-Fritsch scheme (99) (Kain and Fritsch, 1990; 1993)

Πίνακας 2.9. Παραμετροποιήσεις μικροφυσικής (microphysics) που χρησιμοποιούνται για μελέτη βελτίωσης πρόγνωσης νετού.

Κωδικοποίηση παραμετροποίησης	Ονομασία παραμετροποίησης microphysics σχήματος στο WRF (αριθμός επιλογής mp_physics)
mp01	Kessler scheme (1) (Kessler, 1969)
mp02	Lin et al. scheme (2) (Lin et al., 1983; Rutledge and Hobbs, 1984; Tao et al., 1989; Chen and Sun, 2002)
mp03	WSM 3-class simple ice scheme (3) (Hong et al., 2004; Hong and Lim, 2006; Dudhia, 1989)
mp04	WSM 5-class scheme (4) (Hong et al., 2004; Hong and Lim, 2006; Dudhia, 1989; Hong et al., 1998)
mp05	Ferrier (new Eta) microphysics, operational High-Resolution Window version (5) (Rogers et al., 2001)
mp06	WSM 6-class graupel scheme (6) (Hong et al., 2004; Dudhia et al., 2008; Hong and Lim, 2006)
mp07	Goddard 4-ice scheme (7) (Lang et al., 2014; Tao et al., 2016)
mp09	Milbrandt-Yau 2-moment scheme (9) (Milbrandt and Yau, 2005)
mp10	Morrison (2 moments) (10) (Morrison et al., 2008)
mp11	CAM 5.1 microphysics (11) (Neale et al., 2010)
mp13	SBU YLIN scheme (13) (Lin and Colle, 2011)
mp14	WDM 5-class scheme (14) (Lim and Hong, 2010; Hong et al., 2004)
mp16	WDM 6-class scheme (16) (Lim and Hong, 2010; Hong and Lim, 2006)
mp17	NSSL 2-moment 4-ice scheme (steady background CCN) (17) (Gilmore et al., 2004; Mansell et al., 2010)
mp18	NSSL 2-moment 4-ice scheme with predicted CCN (18) (Gilmore et al., 2004; Mansell et al., 2010)
mp19	NSSL 1-moment (7 class: qv,qc,qi,qj,qk,qh; predicts graupel density) (19) (Mansell et al., 2010)
mp21	NSSL 1-moment, (6-class), very similar to Gilmore et al. 2004 (21)
mp22	NSSL 2-moment scheme without hail (steady background CCN) (22)
mp28	aerosol-aware Thompson scheme with water- and ice-friendly aerosol climatology (28) (Thompson and Eidhammer, 2014)
mp50	P3 1-category (50) (Morrison and Milbrandt, 2015)
mp51	P3 1-category plus double-moment cloud water (51) (Morrison and Milbrandt, 2015)
mp52	P3-nc. As P3 but adds supersaturation dependent activation and double-moment cloud water (52) (Morrison and Milbrandt, 2015)

2.2.5 Μέθοδος σύγκρισης προγνωστικών – παρατηρούμενων τιμών θερμοκρασίας

Η επικύρωση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων πρόγνωσης του μοντέλου για τη μετεωρολογική παράμετρο της θερμοκρασίας αέρα στα 2 μέτρα εφαρμόζεται για τις χρονικές στιγμές 04 UTC και 12 UTC, περί τις οποίες εμφανίζονται συνήθως η ελάχιστη και μέγιστη τιμή θερμοκρασίας στην περιοχή μελέτης αντίστοιχα. Οι τιμές θερμοκρασιών των μετεωρολογικών σταθμών στις 04 UTC και 12 UTC συγκρίνονται με τις τιμές πρόγνωσης θερμοκρασιών του μοντέλου για $t+16h$ και $t+24h$ αντίστοιχα, όσον αφορά τον έλεγχο πρόγνωσης για το 1^ο 24ωρο και για $t+40h$ και $t+48h$ αντίστοιχα, όσον αφορά τον έλεγχο πρόγνωσης για το 2^ο 24ωρο. Για τη σύγκριση δεδομένων μετεωρολογικών σταθμών και μοντέλου εφαρμόζεται η μέθοδος Cressman (Colle et al., 1999) για κάθε μετεωρολογικό σταθμό και κάθε WT, όπως ορίζεται προηγουμένως. Σύμφωνα με τη μέθοδο Cressman, οι τιμές θερμοκρασίας αέρα του μοντέλου των τεσσάρων πλησιέστερων σημείων του πλέγματος σε έναν μετεωρολογικό σταθμό χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της αντίστοιχης τιμής στη θέση αυτού του σταθμού, βάσει των εξισώσεων 2.23 και 2.24,

$$T = \left(\sum_{n=1,4} W_n T_n \right) / \left(\sum_{n=1,4} W_n \right) \quad (2.23)$$

$$W_n = \frac{(R^2 - D_n^2)}{(R^2 + D_n^2)}, D < R \quad (2.24)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία στη θέση ενός μετεωρολογικού σταθμού, T_n είναι οι θερμοκρασίες των τεσσάρων πλησιέστερων σημείων του πλέγματος, R είναι η οριζόντια διάσταση του πλέγματος και D_n είναι οι αποστάσεις μεταξύ του μετεωρολογικού σταθμού και κάθε σημείου του πλέγματος (Σχήμα 2.9). Η μέθοδος Cressman εφαρμόζεται επίσης και για τον υπολογισμό του σταθμισμένου υψόμετρου στη θέση κάθε μετεωρολογικού σταθμού με βάση τα υψόμετρα του πλέγματος που χρησιμοποιεί το μοντέλο στα τέσσερα πλησιέστερα σημεία του πλέγματος. Στη συνέχεια, οι προγνώσεις του μοντέλου για τη θερμοκρασία που προκύπτουν από τη μέθοδο Cressman στο σημείο παρατήρησης παρεμβάλλονται γραμμικά από το υπολογισμένο σταθμισμένο υψόμετρο στο υψόμετρο του μετεωρολογικού σταθμού, σύμφωνα με την τυπική εμπειρική θερμοβαθμίδα των 6.5K/km, όπως εφαρμόζεται και σε άλλες έρευνες (π.χ. Pan et al., 2018), προκειμένου να συγκριθούν σωστά οι παρατηρήσεις με τα δεδομένα πρόγνωσης του μοντέλου.



Σχήμα 2.9. Ο αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός των Ιωαννίνων και τα σημεία T_1 , T_2 , T_3 και T_4 τα οποία αποτελούν τα πλησιέστερα πλεγματικά σημεία του μοντέλου στον σταθμό.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το μέσο σφάλμα (ME), όπως ορίζεται από τη σχέση $ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_f - T_o)$, και η τυπική απόκλιση του μέσου σφάλματος (σ), όπως ορίζεται από τη σχέση $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((T_f - T_o) - ME)^2}$, όπου T_f είναι η τιμή θερμοκρασίας που προβλέπεται από το μοντέλο στη θέση του σταθμού, T_o η παρατηρούμενη τιμή και n ο αριθμός των παρατηρήσεων. Ο υπολογισμός του μέσου σφάλματος και της τυπικής απόκλισης αυτού γίνεται για τα ζεύγη τιμών θερμοκρασιών σε κάθε μετεωρολογικό σταθμό που μελετάται και για κάθε WT. Θετικές τιμές του μέσου σφάλματος υποδεικνύουν υπερεκτίμηση της θερμοκρασίας από το μοντέλο, ενώ αρνητικές τιμές αυτού υποδεικνύουν υποεκτίμηση της θερμοκρασίας από το μοντέλο.

Να σημειωθεί ότι στην περίπτωση εφαρμογής εκτελέσεων του μοντέλου WRF για τη βελτιστοποίηση της πρόγνωσης θερμοκρασίας, γίνεται τροποποίηση των παραμετροποιήσεων βασικών φυσικών διεργασιών για τους WTs που παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές πρόγνωσης θερμοκρασίας. Κατά τη διαδικασία αυτή, λαμβάνονται υπόψη οι 6 πλησιέστερες ημέρες στο κέντρο της συστάδας κάθε WT, αντί για τις 64 πλησιέστερες ημέρες που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων θερμοκρασίας του μοντέλου βάση των προεπιλεγμένων παραμετροποιήσεων βασικών φυσικών διεργασιών (Πίνακας 2.6). Ο λόγος που χρησιμοποιείται ένα μικρότερο δείγμα ημερών είναι διότι οι επαναλαμβανόμενες εκτελέσεις του μοντέλου WRF για συγκεκριμένο αριθμό ημερών, με τη χρήση διαφορετικών φυσικών παραμετροποιήσεων κάθε φορά, επιφέρουν σημαντικό υπολογιστικό κόστος. Ο αριθμός των 6 ημερών αντιπροσωπεύει το 1% των ημερών του WT10, ο οποίος παρουσιάζει τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης στην περίοδο μελέτης των 10 ετών και βρίσκεται στους WTs στους οποίους εφαρμόζεται η μελέτη βελτίωσης των προγνωστικών τιμών θερμοκρασίας.

2.2.6 Μέθοδος σύγκρισης προγνωστικών – παρατηρούμενων τιμών ύψους υετού

Η μελέτη των αποτελεσμάτων πρόγνωσης υετού του μοντέλου εφαρμόζεται για τις αθροιστικές τιμές υετού 24 ωρών (24ωρες τιμές). Για το θεωρούμενο 1^ο 24ωρο πρόγνωσης υετού υπολογίζονται αθροιστικά οι τιμές υετού πρόγνωσης από t+12h έως και t+36h, ενώ για το θεωρούμενο 2^ο 24ωρο πρόγνωσης υετού υπολογίζονται οι τιμές από t+36h έως και t+60h. Οι αθροιστικές τιμές υετού 24 ωρών, βάσει του ορισμού που γίνεται προηγουμένως, αναφέρονται σε μια συγκεκριμένη ημέρα που ανήκει σε κάποιο WT κάθε φορά. Η μέθοδος που εφαρμόζεται για τη σύγκριση των δεδομένων υετού των μετεωρολογικών σταθμών με τα δεδομένα πρόγνωσης του μοντέλου είναι η εξής: α) αρχικά εντοπίζεται το πλεγματοειδές τετράγωνο του μοντέλου του οποίου το κέντρο (πλεγματοειδές σημείο) απέχει τη μικρότερη απόσταση από έναν μετεωρολογικό σταθμό, β) στη συνέχεια γίνεται έλεγχος των τιμών προγνωστικού υετού στο πλησιέστερο πλεγματοειδές σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό (κεντρικό πλεγματοειδές τετράγωνο) και στα 8 πλεγματοειδή σημεία που περιβάλλουν το κεντρικό, γ) τέλος επιλέγεται ως προγνωστική τιμή υετού αυτή από τα 9 πλεγματοειδή σημεία που διαφέρει λιγότερο από την παρατηρούμενη τιμή του μετεωρολογικού σταθμού. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόζεται κάθε φορά για κάθε τιμή 24ώρου υετού στην περίοδο μελέτης. Αυτή η μέθοδος αξιολόγησης της ικανότητας πρόγνωσης υετού από το μοντέλο, η οποία χρησιμοποιεί τα $3 \times 3 = 9$ πλεγματοειδή σημεία γύρω από κάθε μετεωρολογικό σταθμό, θεωρεί γενικά ότι είναι αποδεκτό μια πρόγνωση υετού να είναι ελαφρώς μετατοπισμένη χωρικά και να εξακολουθεί να θεωρείται ως μια έγκυρη πρόγνωση. Επίσης, αυτή η μέθοδος ενδείκνυται σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η πρόγνωση υετού πραγματοποιείται σε πλέγμα υψηλής χωρικής ανάλυσης, όπως εφαρμόζεται στην παρούσα διατριβή. Για την επικύρωση των προγνώσεων υετού από το μοντέλο WRF υπολογίζονται στατιστικά σφάλματος όπως επίσης και μέθοδοι αξιολόγησης της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου, που

βασίζονται σε κατώφλια τιμών υετού. Η ίδια μεθοδολογία, για την επαλήθευση του προγνωστικού υετού, έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές σχετικές μελέτες στη βιβλιογραφία (Kotroni and Lagouvardos, 2004; Bartzokas et al., 2010b; Mazarakis et al., 2011; Sindosi et al., 2012; Giannaros et al., 2016). Για την επικύρωση της ημερήσιας συσσωρευμένης βροχόπτωσης, υπολογίζονται το μέσο σφάλμα (mean error, ME), το μέσο απόλυτο σφάλμα (mean absolute error, MAE) και η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (root mean square error, RMSE), όπως φαίνονται στις Εξισώσεις 2.25, 2.26 και 2.27,

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_f - P_o) \quad (2.25)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_f - P_o| \quad (2.26)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_f - P_o)^2}{n}} \quad (2.27)$$

όπου P_f είναι η τιμή υετού που προβλέπεται από το μοντέλο για τη θέση του σταθμού, P_o η παρατηρούμενη τιμή και n ο αριθμός των παρατηρήσεων. Οι υπολογισμοί των στατιστικών σφάλματος γίνεται για τα ζεύγη των παρατηρήσεων και των προγνωστικών δεδομένων, για κάθε WT, λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα υετού από 17 μετεωρολογικούς σταθμούς. Τα στατιστικά σφάλματος για τις αθροιστικές τιμές υετού (P) υπολογίζονται για τις ακόλουθες πέντε κατηγορίες: (α) $\geq 0.5\text{mm}$ $P < 2.5\text{mm}$, (β) $\geq 2.5\text{mm}$ $P < 5.0\text{mm}$, (γ) $\geq 5.0\text{mm}$ $P < 10.0\text{mm}$, (δ) $\geq 10.0\text{mm}$ $P < 20.0\text{mm}$ και (ε) $P \geq 20.0\text{mm}$ και βασίζονται σε επιστημονικές έρευνες αξιολόγησης προγνώσεων υετού που έχουν πραγματοποιηθεί στον ελλαδικό χώρο (Lagouvardos et al., 2003; Mazarakis et al., 2009). Η χρήση κατηγοριών δείχνει τα σφάλματα πρόγνωσης του μοντέλου για μικρές, μεσαίες και μεγάλες ποσότητες υετού και είναι απαραίτητη έτσι ώστε να αποφεύγονται τα μεγάλα σφάλματα στις μικρές κατηγορίες στον υπολογισμό των στατιστικών, που συμβαίνουν μόνο για γεγονότα με μεγάλες ποσότητες υετού. Τα στατιστικά σφάλματος υποδεικνύουν το μέγεθος των σφαλμάτων μιας πρόγνωσης υετού από το μοντέλο και δεν παρέχουν πληροφορία σχετικά με την ικανότητα πρόγνωσης του μοντέλου, δηλαδή τη συχνότητα εμφάνισης των επιτυχημένων ή αποτυχημένων προγνώσεων από το μοντέλο. Για τον σκοπό αυτό είναι απαραίτητο να υπολογιστούν κάποιες συναρτήσεις επίδοσης (categorical statistics), οι οποίες βασίζονται σε δεδομένα εμφάνισης επιτυχημένων ή αποτυχημένων προγνώσεων. Ο υετός αναφέρεται ως ένα απλό δυαδικό γεγονός και η πρόγνωση από ένα μετεωρολογικό μοντέλο για αυτό το γεγονός μπορεί να θεωρηθεί ως μια αδιαμφισβήτητη δήλωση, η οποία θα συμβεί ή δε θα συμβεί. Αυτού του είδους οι προγνώσεις αναφέρονται συνήθως ως προγνώσεις ναι / όχι με πιθανά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.10, ο οποίος αναφέρεται ως πίνακας συνάφειας.

Πίνακας 2.10. Πίνακας συνάφειας για τον υπολογισμό συναρτήσεων επίδοσης

		Παρατηρούμενο γεγονός	
		Ναι	Όχι
Πρόγνωση γεγονότος	Ναι	Hit (H)	False alarm (F)
	Όχι	Miss (M)	Correct rejection (C)

Ένας πίνακας συνάφειας δημιουργείται για ένα γεγονός ή συμβάν, το οποίο στις περιπτώσεις μελέτης υετού, ορίζεται ως ένα κατώφλι υετού το οποίο ξεπερνιέται ή δεν ξεπερνιέται κάθε φορά. Όταν ξεπερνιέται έχουμε επιβεβαίωση του γεγονότος (ναι) ενώ όταν δεν ξεπερνιέται το κατώφλι έχουμε απόρριψη του γεγονότος (όχι). Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.10, ο πίνακας συνάφειας

αποτελείται από τέσσερις παραμέτρους που είναι: α) H, ο αριθμός των περιπτώσεων όπου το ύψος υετού σύμφωνα με την παρατήρηση και το μοντέλο έφτασε ή ξεπέρασε το αναφερόμενο κατώφλι, β) F, ο αριθμός των περιπτώσεων που το μοντέλο προέβλεψε λανθασμένα ύψος υετού μεγαλύτερο της τιμής κατωφλίου, γ) M, ο αριθμός των περιπτώσεων όπου η παρατηρούμενη τιμή έφτασε ή ξεπέρασε την τιμή κατωφλίου όμως το μοντέλο προέβλεψε μικρότερες τιμές και δ) C, ο αριθμός των περιπτώσεων για τις οποίες δε συνέβη το γεγονός ούτε προβλέφθηκε από το μοντέλο. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως ένας πίνακας συνάφειας ορίζεται από ένα γεγονός, άρα για τη μελέτη αρκετών κατωφλίων υετού είναι απαραίτητη η χρήση των αντίστοιχων πινάκων συνάφειας. Στην παρούσα διατριβή, οι συναρτήσεις επίδοσης που υπολογίζονται βασίζονται σε πίνακες συνάφειας για πέντε κατώφλια υετού α) $>0.5 \text{ mm}$, β) $\geq 2.5 \text{ mm}$, γ) $\geq 5.0 \text{ mm}$, δ) $\geq 10.0 \text{ mm}$, και ε) $\geq 20.0 \text{ mm}$. Πληροφορίες για τις συναρτήσεις επίδοσης που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της ικανότητας πρόγνωσης υετού του μοντέλου εμφανίζονται στον Πίνακα 2.11. Μια βασική συνάρτηση επίδοσης είναι η Frequency Bias Index (FBI), η οποία ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού των προβλεπόμενων συμβάντων προς τον αριθμό των πραγματικών συμβάντων. Οι τιμές της συνάρτησης FBI υποδεικνύουν την υπερεκτίμηση ($FBI > 1$) ή την υποεκτίμηση ($FBI < 1$) ενός γεγονότος από το μοντέλο πρόγνωσης. Η συνάρτηση FBI από μόνη της δεν παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ικανότητα πρόγνωσης του μοντέλου, καθώς οποιαδήποτε τιμή μπορεί να επιτευχθεί χωρίς καμία ικανότητα πρόγνωσης ή με οποιαδήποτε ικανότητα πρόγνωσης, απλά αλλάζοντας το όριο κατωφλίου (Hogan and Mason, 2011). Οι ακόλουθες μέθοδοι αξιολόγησης αποτελούν μέτρα επαλήθευσης που επικεντρώνονται στην αντιστοιχία μεταξύ των προγνώσεων και των παρατηρήσεων, δίνοντας τιμές που υποδεικνύουν την ικανότητα του μοντέλου πρόγνωσης. Η συνάρτηση Proportion Correct (PC) ορίζεται ως το ποσοστό των σωστών προβλεπόμενων γεγονότων, συμπεριλαμβανομένων των σωστών απορρίψεων και επηρεάζεται έντονα από το πιο συχνό συμβάν. Η συνάρτηση Probability Of Detection (POD) είναι το ποσοστό των συμβάντων που προβλέφθηκαν σωστά. Η συνάρτηση False Alarm Ratio (FAR) ορίζεται ως το ποσοστό των προβλεπόμενων συμβάντων που δεν παρατηρήθηκαν και πρέπει να αξιολογείται μαζί με τη συνάρτηση POD. Η συνάρτηση Critical Success Index (CSI) (Donaldson et al., 1975) ορίζεται ως ο λόγος των παρατηρηθέντων και / ή προβλεπόμενων συμβάντων που προβλέφθηκαν σωστά. Η συνάρτηση Gilbert Skill Score (GSS) (Schaefer, 1990) αναπτύχθηκε ως μια τροποποίηση της CSI, εισάγοντας ένας διορθωτικό όρο που αφαιρεί έναν αριθμό προβλεπόμενων συμβάντων που τυχαία συμφώνησαν με τις παρατηρήσεις.

Πίνακας 2.11. Συναρτήσεις επίδοσης για αξιολόγηση ημερήσιων τιμών υετού του μοντέλου

Συνάρτηση Επίδοσης	Εξίσωση	Εύρος τιμών	Βέλτιστη τιμή
Frequency Bias Index (FBI)	$FBI = (H+F)/(H+M)$	$0 - \infty$	1
Proportion Correct (PC)	$PC = (H+C)/(H+M+F+C)$	$0 - 1$	1
Probability of Detection (POD)	$POD = H/(H+M)$	$0 - 1$	1
False Alarm Ratio (FAR)	$FAR = F/(H+F)$	$0 - 1$	0
Critical Success Index (CSI)	$CSI = H/(H+F+M)$	$0 - 1$	1
Gilbert Skill Score (GSS)	$GSS = (H-E)/(H+F+M-E),$ $E = (H+M)(H+F)/(H+F+M+C)$	$-1/3 - 1$	1

H, F, M, C όπως ορίζονται στον Πίνακα 2.10.

Οι παραπάνω μέθοδοι αξιολόγησης μπορεί να είναι ασαφείς όταν είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί η συνολική ικανότητα πρόγνωσης υετού του μοντέλου για διαφορετικούς WTs. Αυτό συμβαίνει διότι κάθε συνάρτηση επίδοσης ορίζεται διαφορετικά, με αποτέλεσμα κάθε μια από αυτές να αποδίδει καλύτερα σε συγκεκριμένες συνθήκες συμβάντων υετού. Για τον λόγο αυτό θα ήταν πολύ

χρήσιμο να οριστεί ένας νέος συνδυαστικός δείκτης ο οποίος βασίζεται στις ακόλουθες συναρτήσεις επίδοσης: PC, POD, FAR, CSI και GSS. Ο σκοπός ενός συνδυαστικού δείκτη είναι να κατανοηθεί καλύτερα η συνολική απόδοση με σύνοψη των αποτελεσμάτων των επιμέρους συναρτήσεων και να παρθεί μια τελική απόφαση που αφορά την ικανότητα πρόγνωσης ενός μοντέλου (π.χ. Rodrigo et al., 2018). Ο Συνδυαστικός Δείκτης (ΣΔ) (Combined Index, CI) που εισάγουμε για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής ορίζεται από την εξίσωση 2.28.

$$Combined\ Index = (PC + POD + (1 - FAR) + CSI + GSS) / 5 \quad (2.28)$$

Από τα εύρη τιμών των συναρτήσεων επίδοσης που αποτελούν τον ΣΔ προκύπτει ότι η τιμή του ΣΔ μπορεί να κυμαίνεται από -1/15 έως 1, υποδεικνύοντας τη βέλτιστη ικανότητα πρόγνωσης του μοντέλου όταν η τιμή του είναι ίση με 1 και μηδενική ικανότητα πρόγνωσης όταν η τιμή είναι ίση με 0.

Ο υπολογισμός των συναρτήσεων επίδοσης, όπως επίσης και του ΣΔ, γίνεται με την κατασκευή ενός πίνακα συνάφειας ανά κατώφλι για το σύνολο των ημερών του κάθε WT και των μετεωρολογικών σταθμών (64 ημέρες x 17 σταθμοί = 1088 περιπτώσεις – συμβάντα υετού) και υπολογίζονται τα στοιχεία H, F, M και C του κάθε πίνακα συνάφειας για το αντίστοιχο κατώφλι και WT. Άρα η επίδοση του μοντέλου WRF κρίνεται συνολικά για κάθε WT για τη διαδικασία επικύρωσης και επαλήθευσης του βάσει των προεπιλεγμένων παραμετροποιήσεων βασικών φυσικών διεργασιών. Να σημειωθεί επίσης ότι ο υπολογισμός και η γραφική απεικόνιση των στατιστικών συναρτήσεων, των συναρτήσεων επίδοσης, όπως επίσης και του ΣΔ γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τις περιπτώσεις που φτάνουν τουλάχιστον το 2% των συνολικών δεδομένων (22 περιπτώσεις για κάθε WT) για κάθε κλάση ή κατώφλι υετού.

Στην περίπτωση εφαρμογής εκτελέσεων του μοντέλου WRF για βελτιστοποίηση της πρόγνωσης υετού, με τροποποίηση των παραμετροποιήσεων βασικών φυσικών διεργασιών, λαμβάνονται υπόψη οι 6 πλησιέστερες ημέρες στο κέντρο του WT3, ο οποίος εμφανίζει τα περισσότερα συμβάντα υετού σε όλους τους μετεωρολογικούς σταθμούς και για αυτό κρίνεται κατάλληλος για τη μελέτη βελτιστοποίησης αποτελεσμάτων υετού του μοντέλου. Να σημειωθεί ότι στην περίπτωση αυτή ο υπολογισμός των συναρτήσεων επίδοσης, όπως επίσης και του ΣΔ, γίνεται με την κατασκευή ενός πίνακα συνάφειας ανά κατώφλι για το σύνολο των ημερών του WT3 και των μετεωρολογικών σταθμών (6 ημέρες x 17 σταθμοί = 102 περιπτώσεις) για κάθε παραμετροποίηση ξεχωριστά και υπολογίζονται τα στοιχεία H, F, M και C του κάθε πίνακα συνάφειας για το αντίστοιχο κατώφλι και την αντίστοιχη φυσική παραμετροποίηση. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο λόγος που χρησιμοποιείται ένα μικρότερο δείγμα ημερών στις διαδικασίες βελτίωσης των αποτελεσμάτων πρόγνωσης, οφείλετε στο σημαντικό υπολογιστικό κόστος που επιφέρουν αυτές. Ο αριθμός των 6 ημερών αντιπροσωπεύει το 2% των ημερών εμφάνισης του WT3, στην περίοδο μελέτης των 10 ετών.

Κεφάλαιο 3

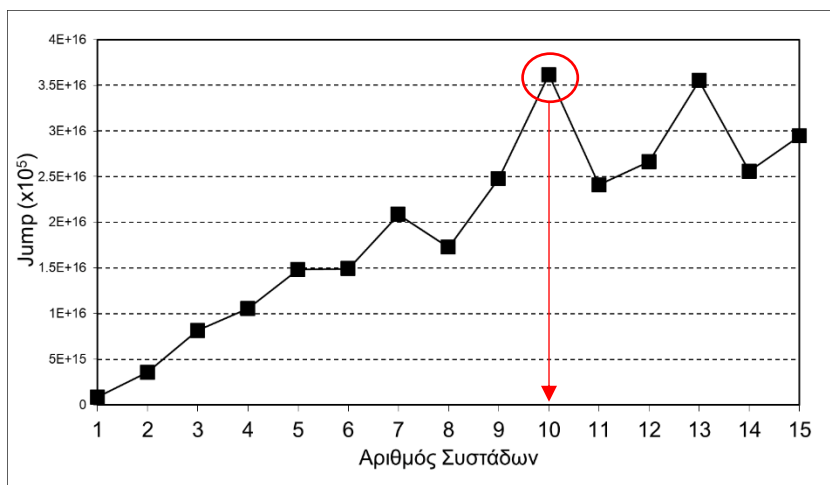
Αποτελέσματα

3.1 Ταξινόμηση τύπων καιρού για την περιοχή της ΒΔ Ελλάδας

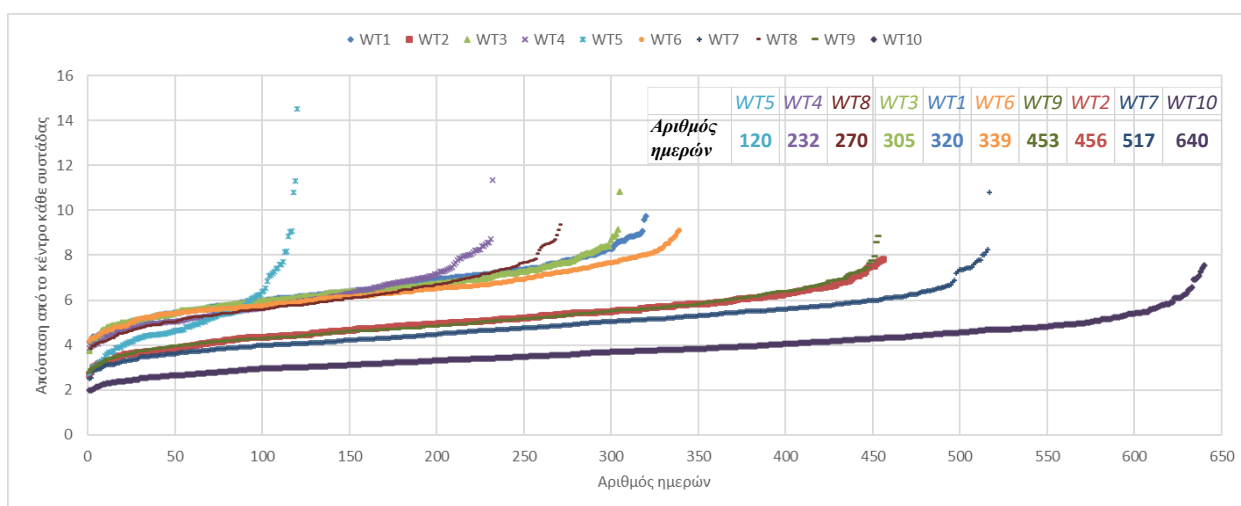
Στον Πίνακα 3.1 εμφανίζεται ο αριθμός παραγόντων (factors) που προκύπτουν από την εφαρμογή της FA για 12 μετεωρολογικές παραμέτρους ξεχωριστά και τα αντίστοιχα ποσοστά ολικής διακύμανσης που ερμηνεύουν τις αρχικές μεταβλητές (χρονοσειρές) αυτών. Συνολικά προκύπτουν 47 παράγοντες από την εφαρμογή της FA για όλες τις μετεωρολογικές παραμέτρους. Επίσης, στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα Jump, το οποίο χρησιμοποιείται συμβουλευτικά για την επιλογή του αριθμού των τελικών συστάδων από την εφαρμογή της CA στις χρονοσειρές των 47 παραγόντων, που προκύπτουν από την FA, όπου για την τιμή 10 παρουσιάζεται η υψηλότερη τιμή άλματος. Από το διάγραμμα Jump όπως επίσης και από τη δυνατότητα φυσικής ερμηνείας των αποτελεσμάτων της CA προκύπτει ο τελικός αριθμός των 10 συστάδων. Η κάθε συστάδα συνίσταται από ένα σύνολο ημερών στην περίοδο μελέτης που παρουσιάζει κοινά χαρακτηριστικά βάση των μετεωρολογικών παραμέτρων, από τις οποίες έχουν προσδιοριστεί, και η οποία εκφράζει στην ουσία έναν WT. Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η απόσταση από το κέντρο κάθε συστάδας για κάθε ημέρα που περιλαμβάνει η κάθε συστάδα (διασπορά των WTs), όπως επίσης και ο αριθμός ημερών που εμφανίζεται ο κάθε WT στην περίοδο μελέτης των 10 ετών. Στα Σχήματα 3.3 έως και 3.12 παρουσιάζονται οι μέσοι χάρτες στις 12 UTC της θερμοκρασίας του αέρα σε ύψος 2 μέτρων, της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου σε ύψος 10 μέτρων, των γεωδυναμικών υψών των ισοβαρικών επιφανειών 500hPa και 1000hPa, της θερμοκρασίας του αέρα στην ισοβαρική επιφάνεια των 850hPa και η μηνιαία κατανομή συχνοτήτων για τους 10 WTs. Οι αναφερόμενοι μέσοι χάρτες που απεικονίζονται στα Σχήματα 3.3 έως και 3.12 αποτελούν μια ενδεικτική εικόνα των κύριων χαρακτηριστικών συνοπτικής κλίμακας, της κατανομής των θερμοκρασιών και του πεδίου ανέμων των WTs. Το σύνολο των μέσων χαρτών, που αφορά όλες τις μετεωρολογικές παραμέτρους για όλες τις χρονικές στιγμές υπολογισμού τους, απεικονίζεται στο Παράρτημα Α.

Πίνακας 3.1. Αριθμός παραγόντων της FA για κάθε μετεωρολογική παράμετρο ξεχωριστά και ποσοστό της συνολικής διακύμανσης που ερμηνεύουν.

A/A	Μετεωρολογική παράμετρος	Παράγοντες (Factors)	Ποσοστό ολικής διακύμανσης
1	Θερμοκρασία στα 2 μέτρα	3	97%
2	Θερμοκρασία δρόσου στα 2 μέτρα	3	94%
3	Ζωνική συνιστώσα ταχύτητας ανέμου στα 10 μέτρα (u)	6	74%
4	Μεσημβρινή συνιστώσα ταχύτητας ανέμου στα 10 μέτρα (v)	3	68%
5	Ολική νεφοκάλυψη	3	65%
6	Νεφοκάλυψη χαμηλών νεφών	5	58%
7	Νεφοκάλυψη μεσαίων νεφών	3	61%
8	Νεφοκάλυψη υψηλών νεφών	4	70%
9	Δυναμικά διαθέσιμη ενέργεια ανωμεταφοράς (CAPE)	3	62%
10	Θερμοκρασία στην ισοβαρική επιφάνεια των 850hPa	4	87%
11	Γεωδυναμικό ύψος της ισοβαρικής επιφάνειας των 500hPa	5	92%
12	Γεωδυναμικό ύψος της ισοβαρικής επιφάνειας των 1000hPa	5	84%



Σχήμα 3.1. Διάγραμμα του Άλματος (Jump) για την επιλογή του αριθμού συστάδων και σημείωση επιλογής (με κόκκινο χρώμα).



Σχήμα 3.2. Διασπορά εντός των τύπων καιρού και αριθμός ημερών εμφάνισης τους στην περίοδο μελέτης.

Ακολουθεί η ανάλυση των χαρακτηριστικών κάθε WT που έχει προκύψει από τη μεθοδολογία προσδιορισμού των WTs.

Ο WT1 (Σχήμα 3.3) είναι ένας WT της ψυχρής περιόδου του έτους, που επικρατεί γενικά από τον Οκτώβριο μέχρι τον Απρίλιο με μέγιστο συχνότητας εμφάνισης τον Ιανουάριο. Χαρακτηρίζεται από ένα βαρομετρικό χαμηλό με κέντρο στην περιοχή της Γένοβας, το οποίο προκαλεί θερμή μεταφορά στην περιοχή της δυτικής Ελλάδας και επικράτηση ανέμων νότιας διεύθυνσης στο Ιόνιο, με το μέγιστο της έντασης τους να παρατηρείται τις μεσημβρινές και απογευματινές ώρες. Το μέγιστο ποσοστό εμφάνισης νεφώσεων παρατηρείται κυρίως τις βραδινές ώρες σε ολόκληρη την περιοχή της ΒΔ Ελλάδας.

Ο WT2 (Σχήμα 3.4) είναι ένας WT των μεταβατικών εποχών, με το μέγιστο συχνότητας εμφάνισης να παρουσιάζεται τον Απρίλιο και τον Μάιο. Χαρακτηρίζεται από αντικυκλωνική κυκλοφορία με κέντρο υψηλών πιέσεων δυτικά της Πελοποννήσου. Στην περιοχή της Ηπείρου και της δυτικής Μακεδονίας επικρατούν ασθενείς άνεμοι μεταβλητών διευθύνσεων στη διάρκεια της ημέρας και διάσπαρτες νεφώσεις στην οροσειρά της Πίνδου και των περιοχών δυτικά αυτής.

Ο WT3 (Σχήμα 3.5) είναι ένας WT της ψυχρής περιόδου του έτους, με μέγιστο εμφάνισης τον Φεβρουάριο. Χαρακτηρίζεται από ένα βαρομετρικό χαμηλό στην κεντρική περιοχή της Μεσογείου το οποίο προκαλεί εκτεταμένες νεφώσεις, με το μεγαλύτερο ποσοστό να αποτελούν τα χαμηλά νέφη, και είναι υπεύθυνο συνήθως για κακοκαιρία στη ΒΔ Ελλάδα. Στην περιοχή του Ιονίου επικρατούν μέτριοι έως ισχυροί άνεμοι νοτίων διευθύνσεων, οι οποίοι μεταβάλλονται σε δυτικούς τις βραδινές ώρες.

Ο WT4 (Σχήμα 3.6) είναι ένας WT της ψυχρής περιόδου του έτους, με μέγιστο εμφάνισης τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο. Χαρακτηρίζεται από ένα βαρομετρικό χαμηλό με κέντρο στα Δωδεκάνησα και από μια ατμοσφαιρική διαταραχή που παρατηρείται στην ανώτερη ατμόσφαιρα πάνω από τα Βαλκάνια. Το χαμηλό προκαλεί ισχυρούς ανέμους στο Ιόνιο βόρειων διευθύνσεων και ΒΑ καταβατικό άνεμο στην Ήπειρο. Αυτός ο WT, εμφανίζει πολύ χαμηλές μέσες θερμοκρασίες καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, ιδιαίτερα στα ορεινά της περιοχής.

Ο WT5 (Σχήμα 3.7) είναι ένας WT της θερμής περιόδου του έτους, με μέγιστο εμφάνισης τον Ιούνιο. Είναι ο λιγότερο συχνός WT με μόλις 12 ημέρες εμφάνισης στη διάρκεια ολόκληρου του έτους. Είναι ένας τυπικός θερινός WT με κέντρο χαμηλών πιέσεων στην περιοχή της Κύπρου. Στην περιοχή της Ηπείρου και της δυτικής Μακεδονίας παρατηρούνται νεφώσεις στα ορεινά, ιδιαίτερα τις μεσημβρινές και απογευματινές ώρες. Σε αυτόν τον WT επικρατούν πολύ ασθενείς άνεμοι σε ολόκληρη την περιοχή ιδιαίτερα τις πρωινές ώρες. Ακόμη παρατηρούνται οι υψηλότερες τιμές στους μέσους χάρτες της δυνητικά διαθέσιμης ενέργειας ανωμεταφοράς (CAPE), ανάμεσα σε όλους του WTs, γεγονός που σημαίνει ότι υπάρχει μεγάλη αστάθεια στην ατμόσφαιρα η οποία μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη καταιγιδοφόρων νεφών.

Ο WT6 (Σχήμα 3.8) είναι ένας WT της ψυχρής περιόδου του έτους, με μέγιστο εμφάνισης συχνότητας τον Φεβρουάριο. Χαρακτηρίζεται από το χαμηλό στην περιοχή της Σικελίας. Προκαλεί άνεμο ανατολικής διεύθυνσης στην Ήπειρο, ενώ στο Ιόνιο επικρατούν άνεμοι ΝΑ διευθύνσεων. Χαρακτηριστικά είναι τα υψηλά ποσοστά νέφωσης σε ολόκληρη την περιοχή, ενώ αξιοσημείωτη είναι η μεταβολή του ποσοστού χαμηλών νεφών που συμβαίνει από τα ανατολικά προς τα δυτικά της οροσειράς της Πίνδου, με τις τιμές να κυμαίνονται από 80% σε 15% αντίστοιχα.

Ο WT7 (Σχήμα 3.9) είναι ένας WT της θερμής περιόδου του έτους, που επικρατεί από τον Μάιο μέχρι τον Σεπτέμβριο εμφανίζοντας μέγιστο τον Ιούνιο. Αυτός ο WT χαρακτηρίζεται από την τυπική θερινή κυκλοφορία, όμως υπάρχει μεγαλύτερη αστάθεια στην ατμόσφαιρα, μεταξύ των WTs της θερμής περιόδου του έτους, όπως φαίνεται στον χάρτη ανώτερης ατμόσφαιρας. Επίσης εμφανίζει το μεγαλύτερο ποσοστό ολικής νέφωσης στα ηπειρωτικά της ΒΔ Ελλάδας από όλους τους θερινούς τύπους καιρού, ιδιαίτερα τις μεσημβρινές ώρες.

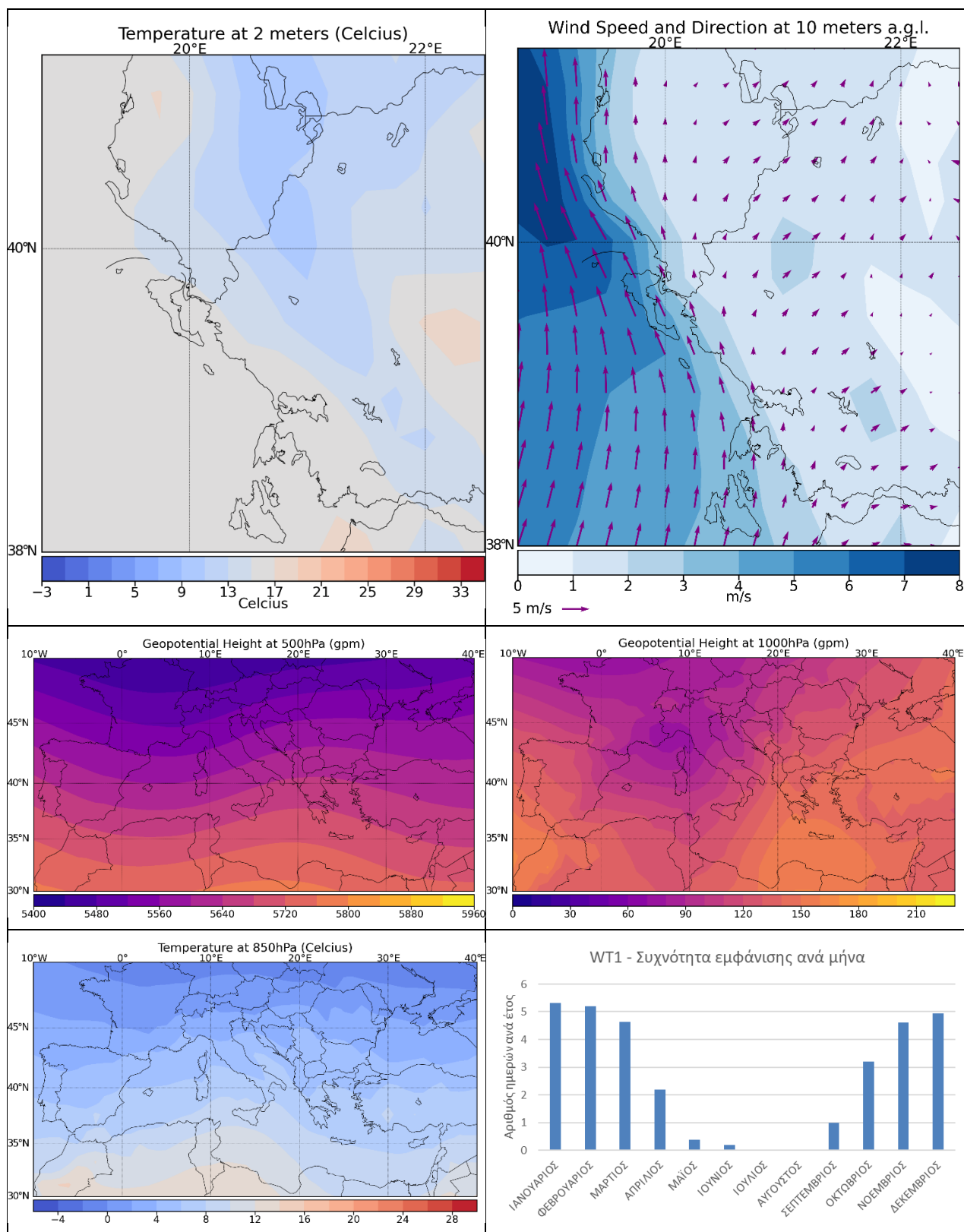
Ο WT8 (Σχήμα 3.10) είναι ένας WT της ψυχρής περιόδου του έτους, που επικρατεί γενικά από τον Οκτώβριο μέχρι τον Μάιο, με μέγιστο εμφάνισης τον Φεβρουάριο. Χαρακτηρίζεται από τη μεγαλύτερη βαθμίδα γεωδυναμικού ύψους στα 500hPa, με επικράτηση ανέμων δυτικών διευθύνσεων στην επιφάνεια του εδάφους στο Ιόνιο καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και στην Ήπειρο τις μεσημβρινές ώρες. Παρατηρούνται επίσης υψηλά ποσοστά νεφώσεων σε όλη την έκταση κυρίως των ορεινών όγκων της ΒΔ Ελλάδας ιδιαίτερα τις πρώτες πρωινές ώρες.

Ο WT9 (Σχήμα 3.11) είναι ο πιο συχνός WT της ψυχρής περιόδου του έτους, με περίπου 45 ημέρες εμφάνισης στη διάρκεια όλου του έτους. Επικρατεί γενικά από τον Οκτώβριο μέχρι τον Μάρτιο με μέγιστο εμφάνισης τον Δεκέμβριο. Χαρακτηρίζεται από αντικυκλωνική κυκλοφορία με κέντρο υψηλών πιέσεων στην περιοχή του Παλέρμο η οποία σε συνδυασμό με ένα βαρομετρικό

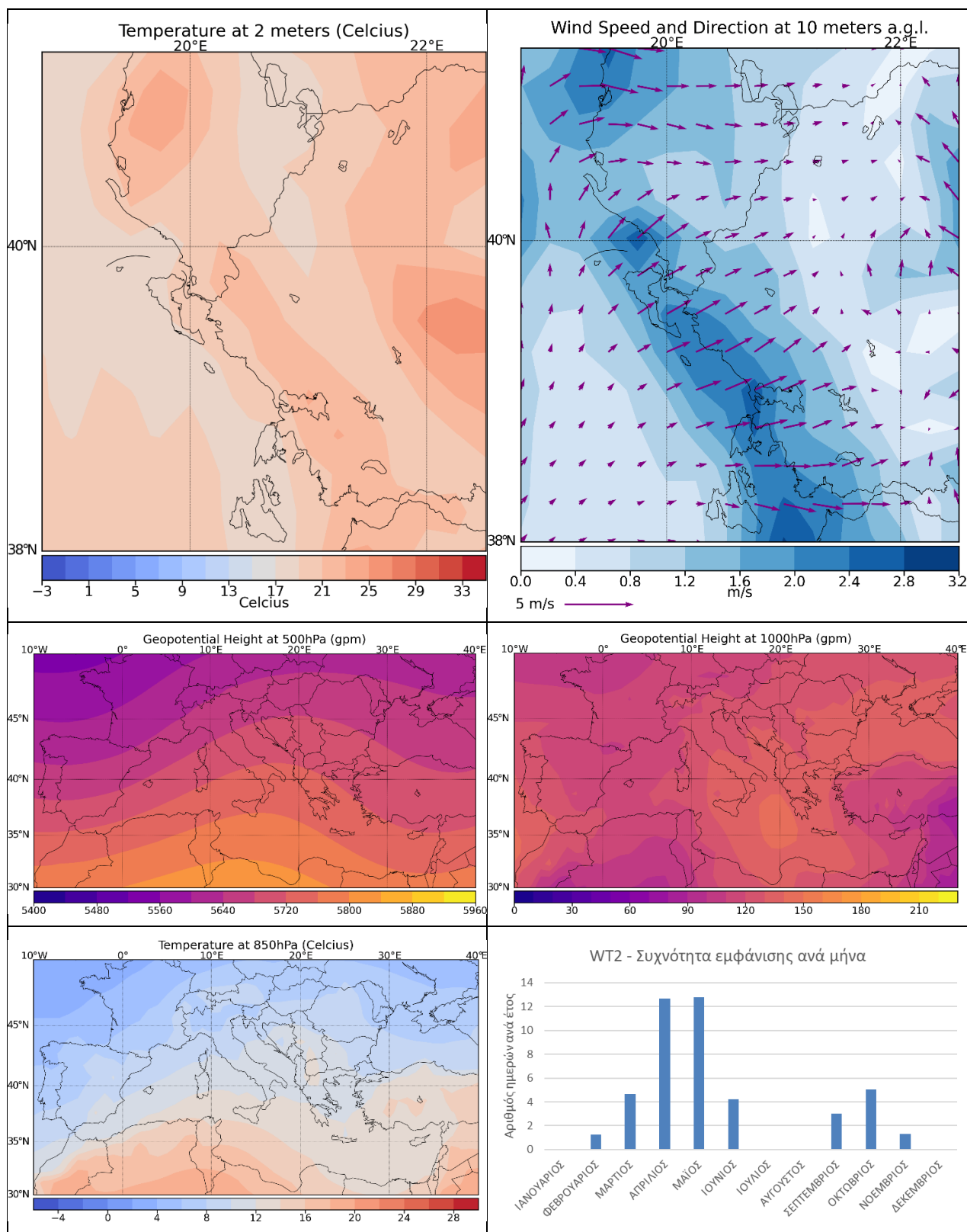
χαμηλό με κέντρο στην περιοχή της Κύπρου, προκαλεί επικράτηση ανέμων βορείων διευθύνσεων και ψυχρή μεταφορά στο Ιόνιο και στα ηπειρωτικά της ΒΔ Ελλάδας. Αυτός ο WT εμφανίζει τις χαμηλότερες μέσες τιμές θερμοκρασιών τις πρωινές ώρες ανάμεσα σε όλους του WTs.

Ο WT10 (Σχήμα 3.12) είναι ο συχνότερα εμφανιζόμενος WT ανάμεσα σε όλους του WTs με 64 ημέρες εμφάνισης στη διάρκεια ενός έτους. Ανήκει στη θερμή περίοδο του έτους που επικρατεί από τον Ιούνιο μέχρι τον Σεπτέμβριο, με μέγιστο εμφάνιση τον Αύγουστο. Χαρακτηρίζεται από την τυπική θερινή κυκλοφορία με το μικρότερο ποσοστό νέφωσης στους θερινούς τύπους και τις υψηλότερες μέσες θερμοκρασίες τις μεσημβρινές ώρες για όλους τους τύπους καιρού με επικράτηση ανέμων ΒΔ διευθύνσεων στο Ιόνιο και εμφάνιση φαινομένων θαλάσσιας αύρας στα ηπειρωτικά πλησίον του Ιονίου.

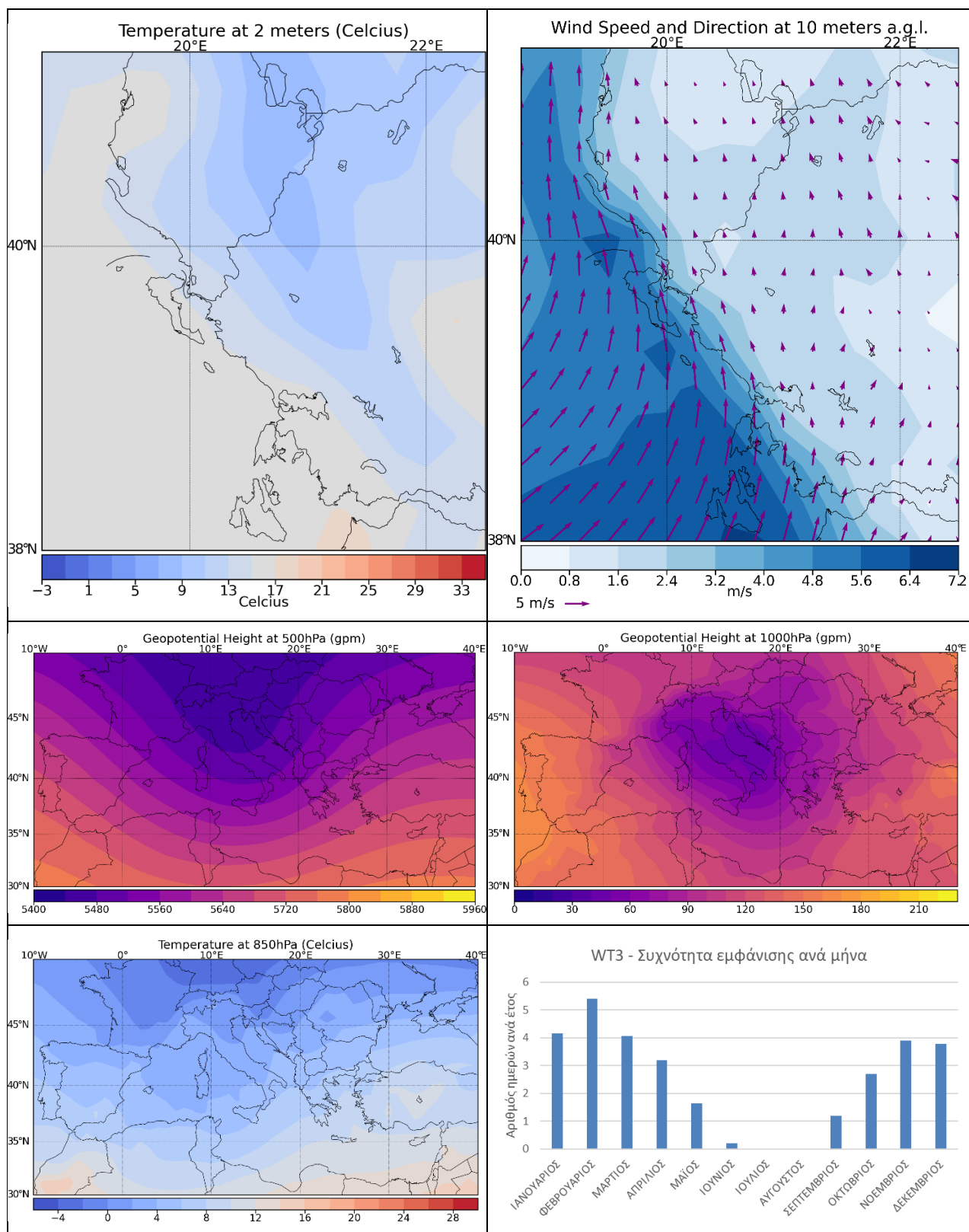
Συνοψίζοντας, οι διαφορετικοί WTs αντικατοπτρίζουν τις εποχικές μεταβολές στο κλίμα της βορειοδυτικής Ελλάδας, επισημαίνοντας την πολυπλοκότητα και μεταβλητότητα των καιρικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή. Λεπτομερή χαρακτηριστικά των WTs μπορούν να βρεθούν στο Παράρτημα Α, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.



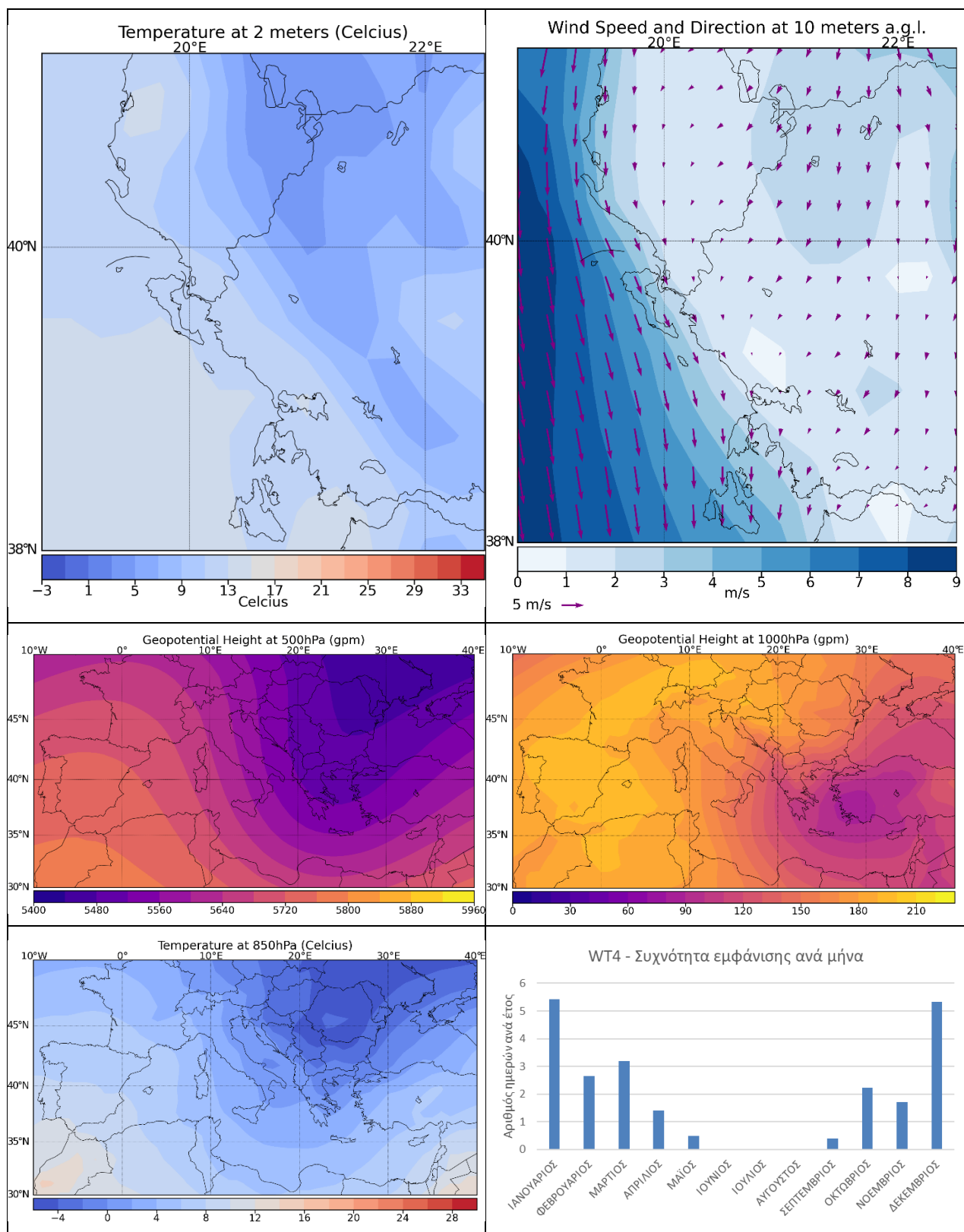
Σχήμα 3.3. Χάρτες των μέσων χωρικών κατανομών στις 12 UTC της θερμοκρασίας του αέρα (°C) στα 2 μέτρα και της διεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου (m/s) στα 10 μέτρα στην περιοχή της ΒΔ Ελλάδος και του γεωδυναμικού ύψους (gpm) των 500 hPa και 1000 hPa, και της θερμοκρασίας στα 850 hPa (°C) στην περιοχή της Μεσογείου, καθώς και μηνιαία κατανομή συχνοτήτων για τον WT1.



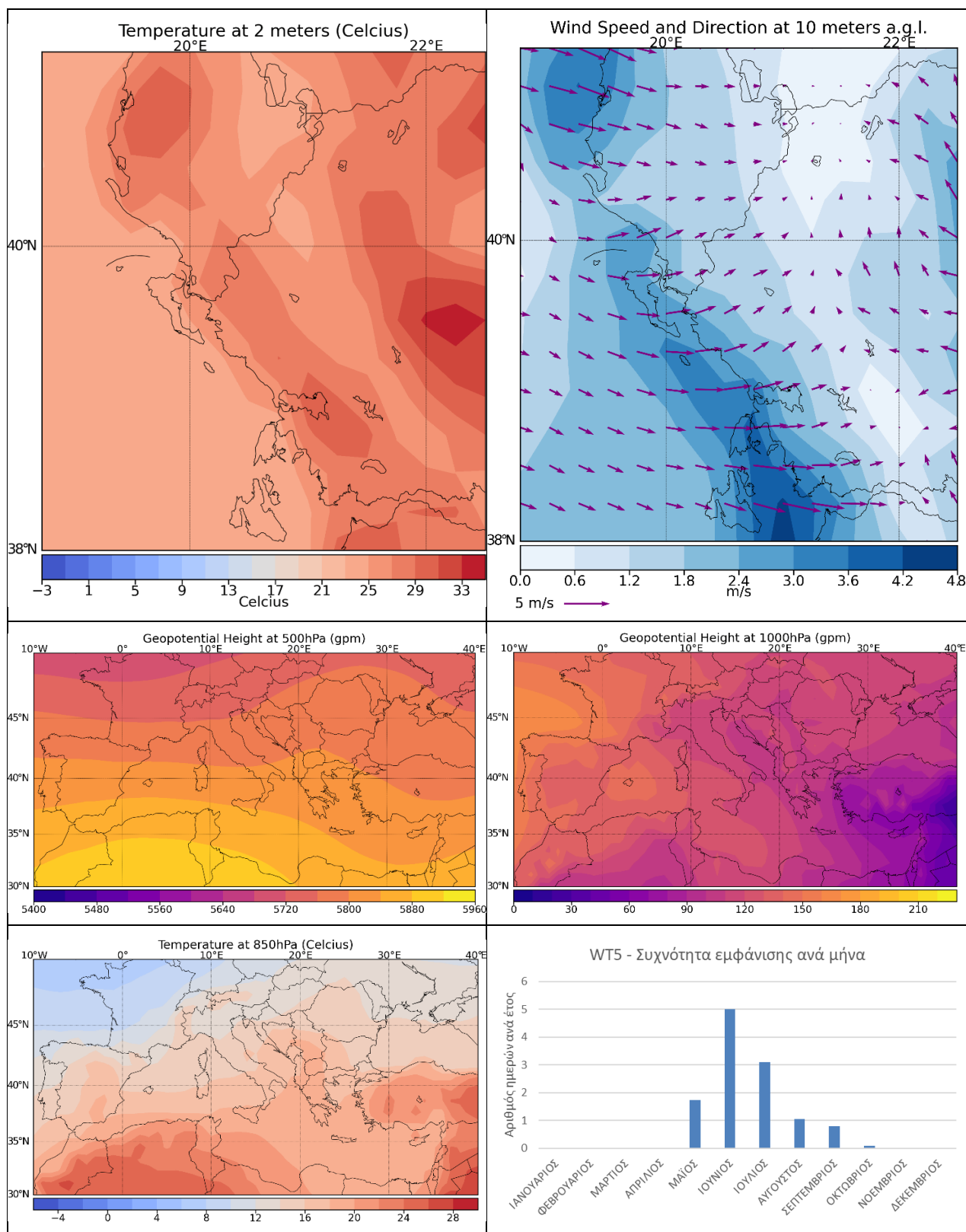
Σχήμα 3.4. Όπως στο Σχήμα 3.3, αλλά για τον WT2.



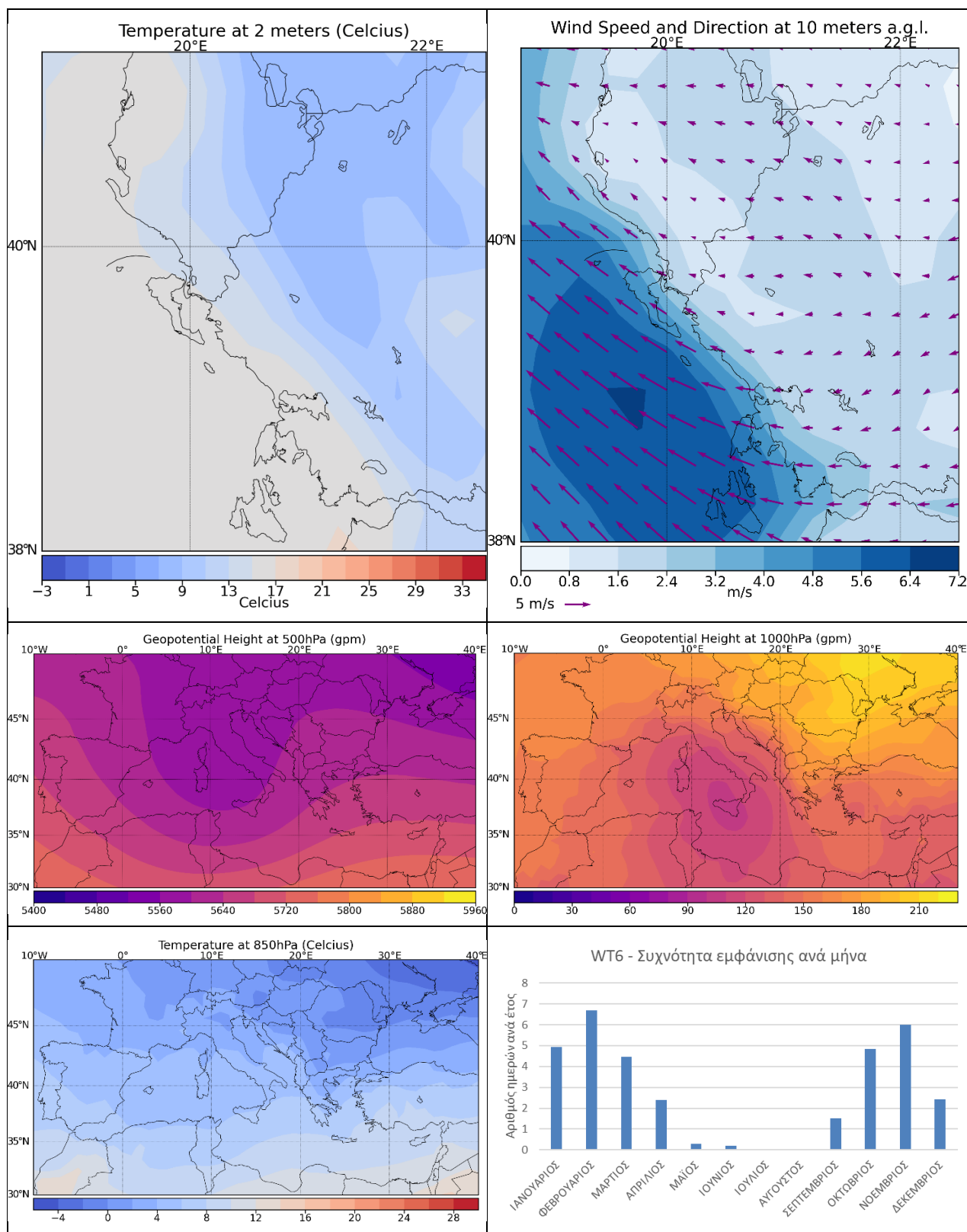
Σχήμα 3.5. Όπως στο Σχήμα 3.3, αλλά για τον WT3.



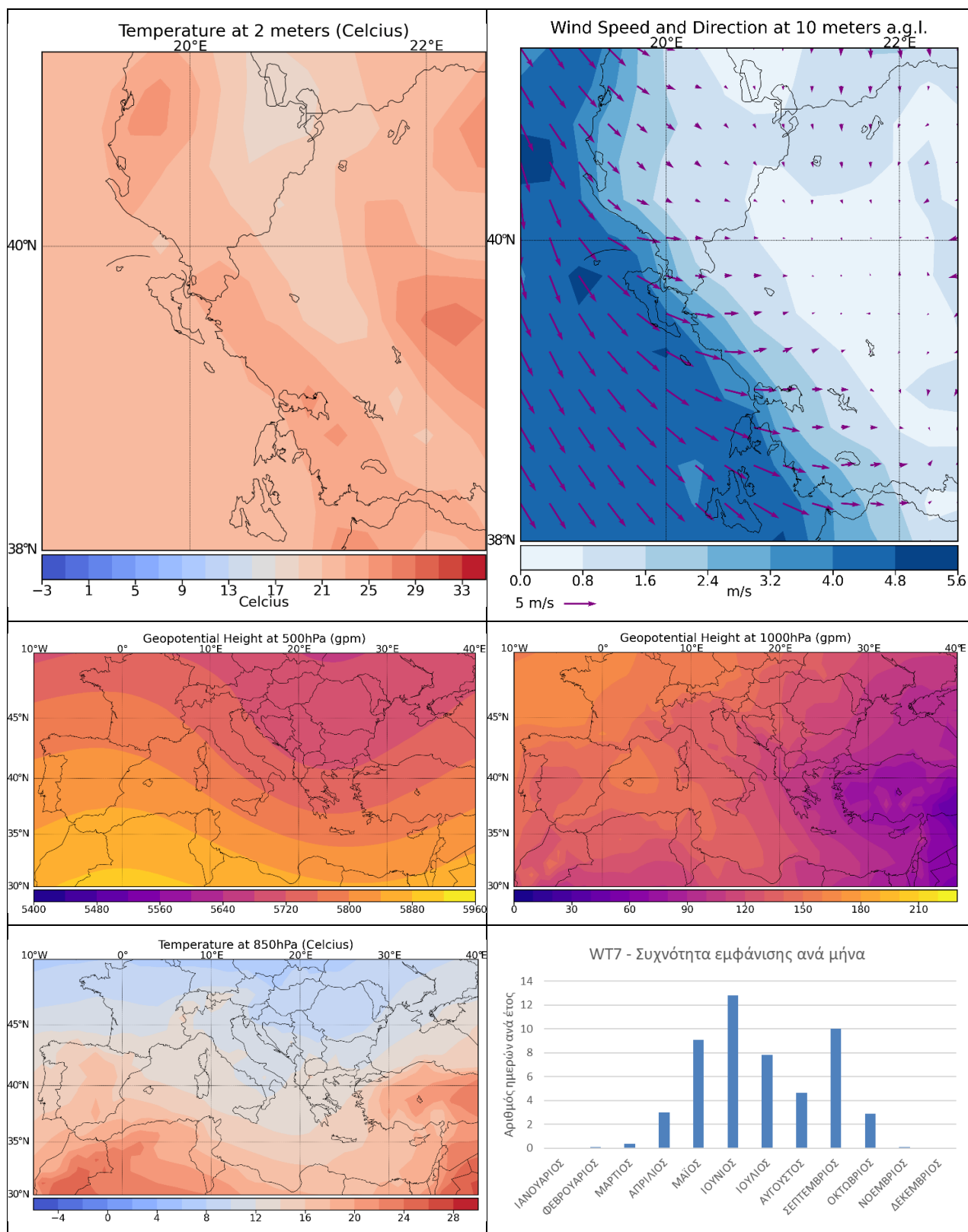
Σχήμα 3.6. Όπως στο Σχήμα 3.3, αλλά για τον WT4.



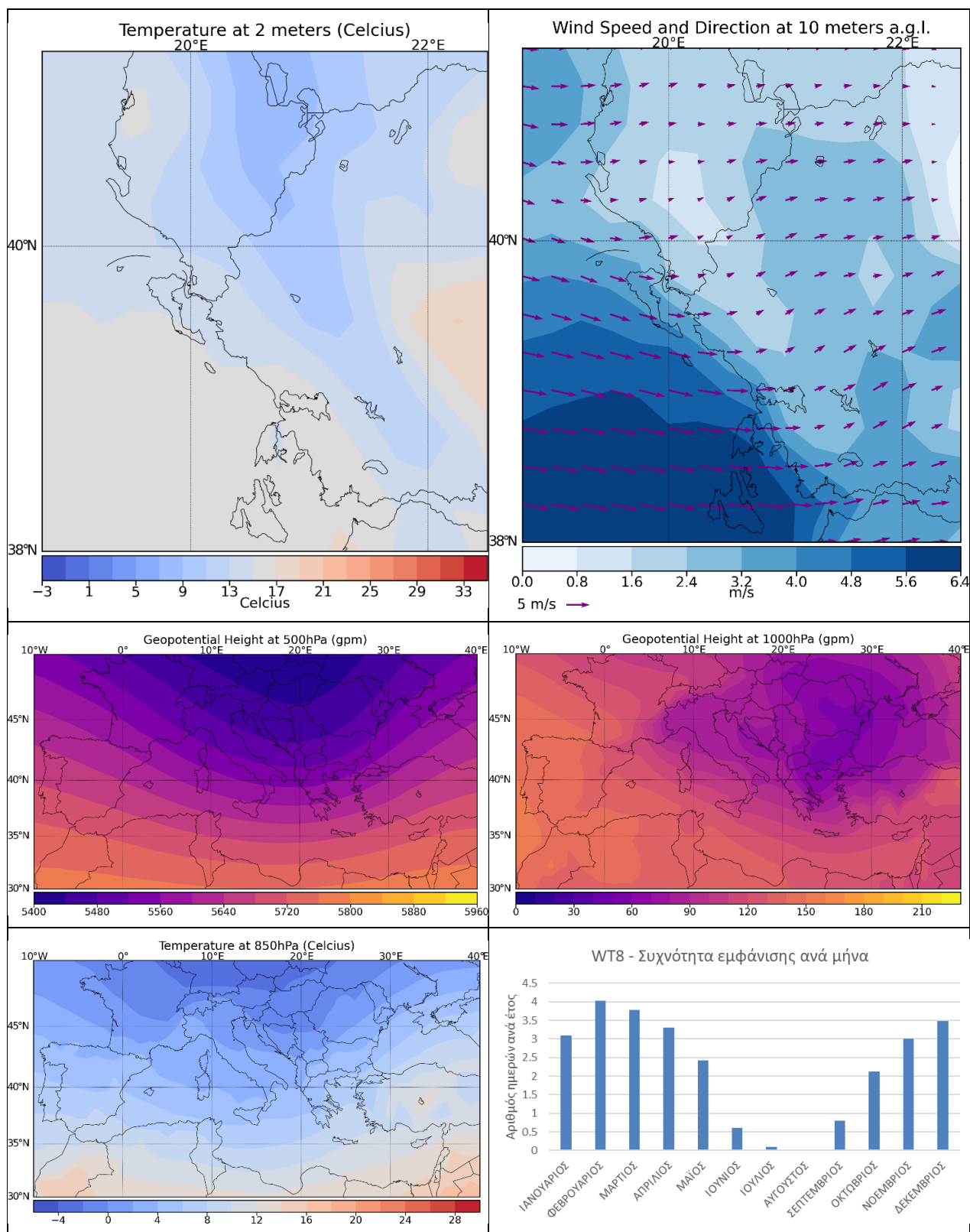
Σχήμα 3.7. Όπως στο Σχήμα 3.3, αλλά για τον WT5.



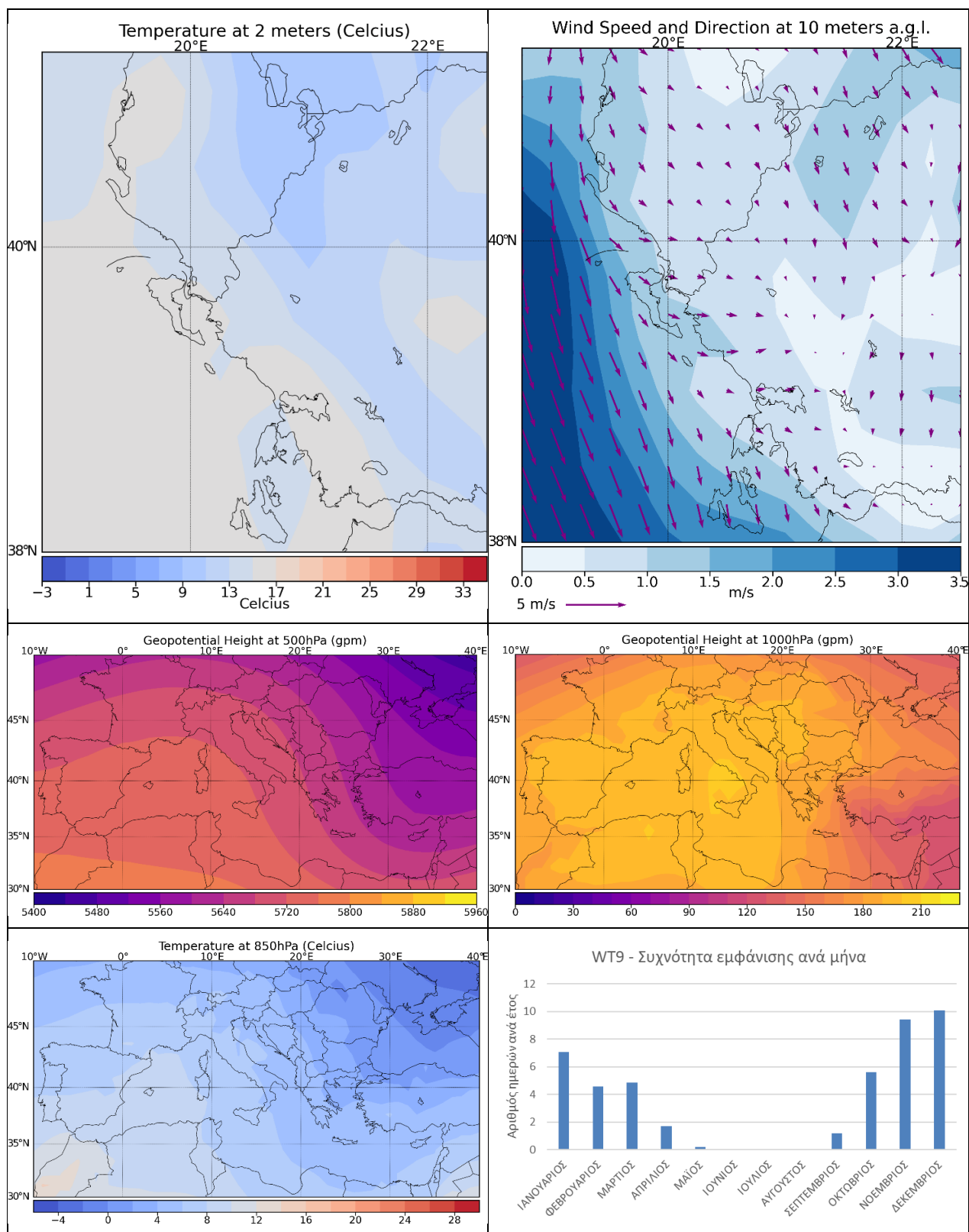
Σχήμα 3.8. Όπως στο Σχήμα 3.3, αλλά για τον WT6.



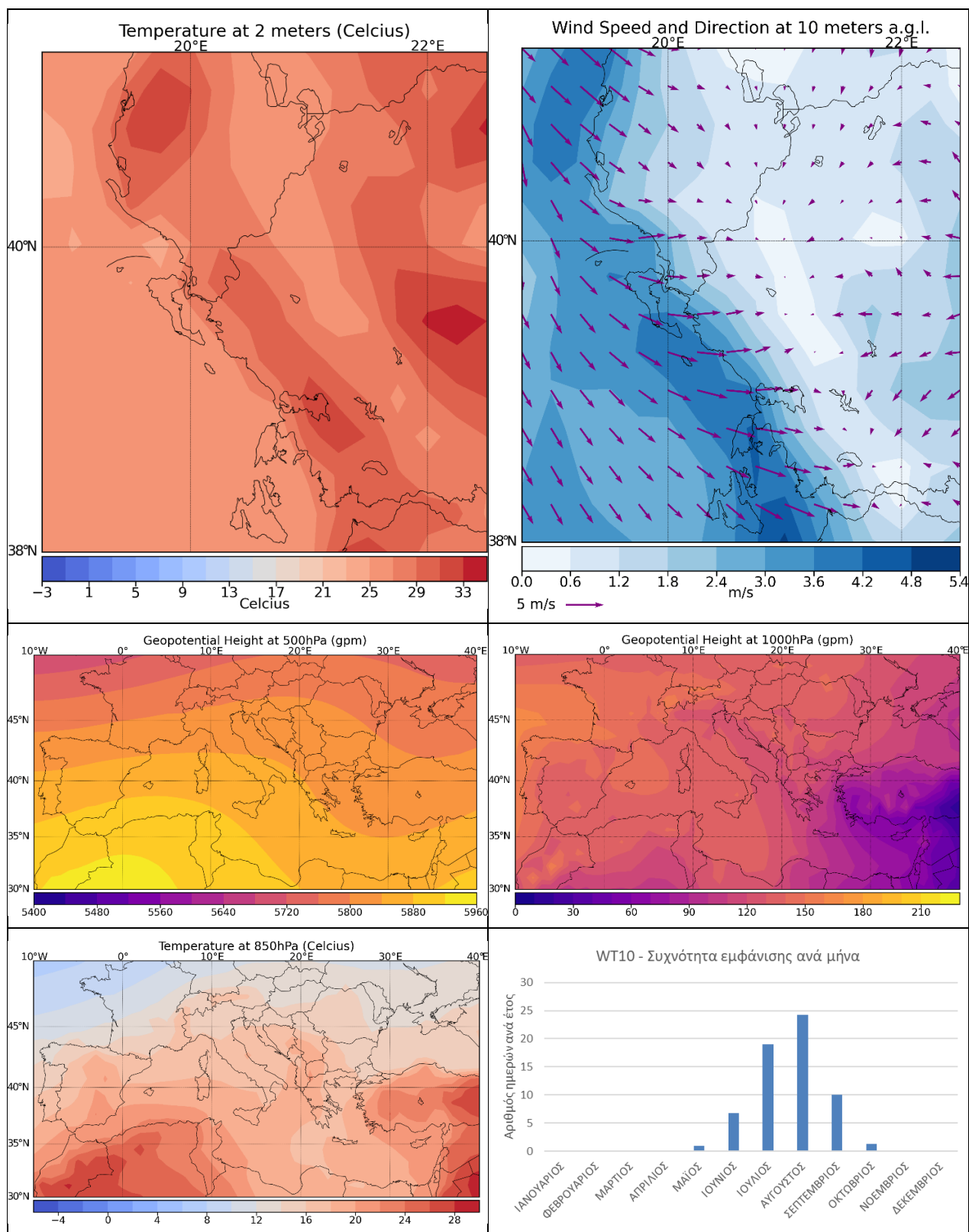
Σχήμα 3.9. Όπως στο Σχήμα 3.3, αλλά για τον WT7.



Σχήμα 3.10. Όπως στο Σχήμα 3.3, αλλά για τον WT8.



Σχήμα 3.11. Όπως στο Σχήμα 3.3, αλλά για τον WT9.



Σχήμα 3.12. Όπως στο Σχήμα 3.3, αλλά για τον WT10.

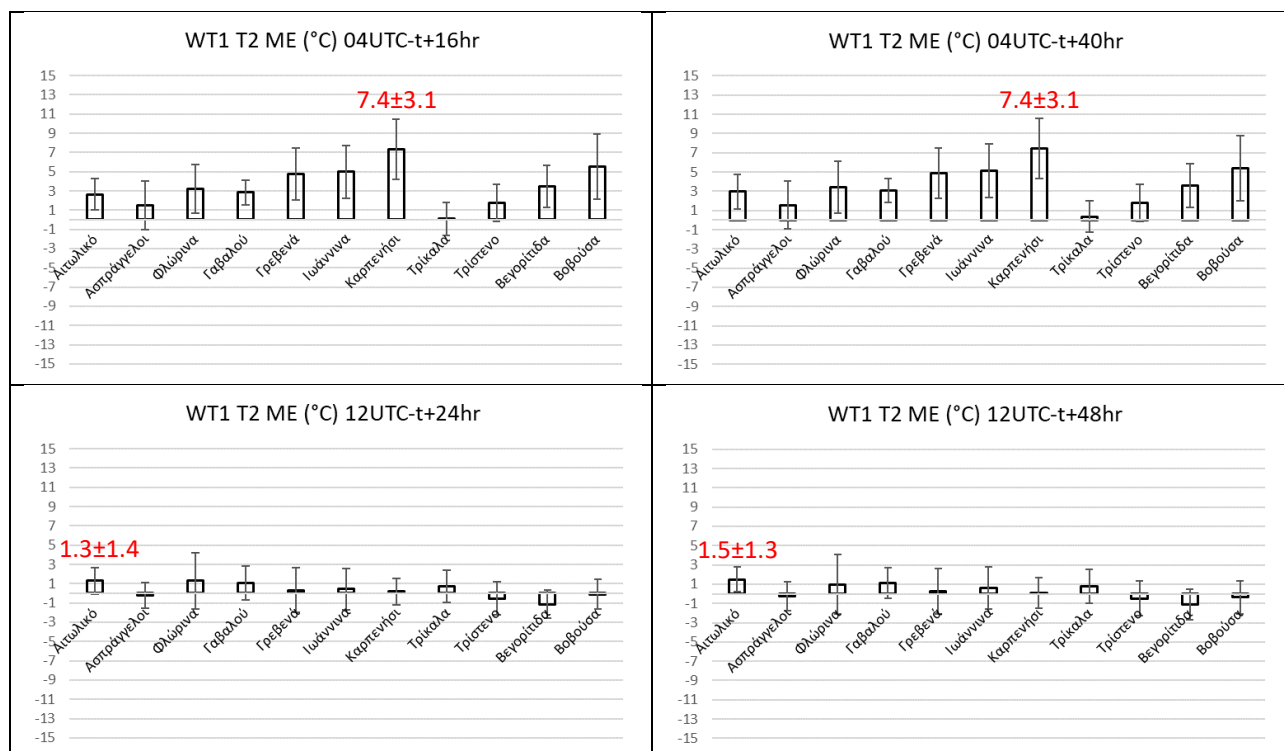
3.2 Αξιολόγηση προγνωστικών τιμών θερμοκρασίας

Για την αξιολόγηση των προγνωστικών τιμών θερμοκρασίας αέρα στα 2 μέτρα στις 04 UTC και 12 UTC, εφαρμόζεται η μεθοδολογία Cressman, όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2.2.5, χρησιμοποιώντας τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις βασικών φυσικών διεργασιών του μοντέλου WRF (Πίνακας 2.6). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για την ορθή σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με αυτά των σταθμών εφαρμόζεται μια διόρθωση θερμοκρασίας σε κάθε σταθμό ανάλογα την τιμή του σταθμισμένου υψόμετρου που προκύπτει από το μοντέλο και τη διαφορά της από το πραγματικό υψόμετρο του σταθμού. Αυτή η διόρθωση γίνεται με τη χρήση της τυπικής εμπειρικής θερμοβαθμίδας των 6.5K/km. Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται τα δεδομένα των σταθμισμένων υψομέτρων του μοντέλου για κάθε σταθμό και η διόρθωση θερμοκρασίας που εφαρμόζεται στα αποτελέσματα του μοντέλου έτσι ώστε να συγκριθούν ορθά με τις μετρήσεις των σταθμών. Στα Σχήματα 3.13-3.22, παρουσιάζονται οι τιμές των μέσων σφαλμάτων (ME) και των τυπικών αποκλίσεων αυτών για 64 ζεύγη τιμών μοντέλου – παρατηρήσεων θερμοκρασιών στα 2 μέτρα, για κάθε WT και για 11 μετεωρολογικούς σταθμούς. Στους υπολογισμούς δε λαμβάνονται υπόψη περιπτώσεις ελλειπόν τιμών στις παρατηρήσεις των σταθμών, με αποτέλεσμα τα ζεύγη τιμών μοντέλου – παρατηρήσεων που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς να είναι κάποιες φορές λιγότερα από 64.

Πίνακας 3.2. Σταθμισμένες τιμές υψομέτρων του μοντέλου και τιμές διόρθωσης θερμοκρασιών των μετεωρολογικών σταθμών που χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση προγνωστικών τιμών και παρατηρήσεων.

A/A	Όνομα σταθμού	Γεωγρ. πλάτος (DD)	Γεωγρ. μήκος (DD)	Υψόμετρο σταθμού (m)	Σταθμισμένο υψόμετρο μοντέλου (m)	$\Delta\theta$ (°C)
1	Αιτωλικό	38.44	21.36	3	17.8	+0.10
2	Ασπράγγελοι	39.83	20.72	945	942.8	-0.01
3	Φλώρινα	40.79	21.42	637	665.0	+0.18
4	Γαβαλού	38.53	21.53	55	87.2	+0.21
5	Γρεβενά	40.09	21.44	510	561.7	+0.34
6	Ιωάννινα	39.62	20.86	475	481.6	+0.04
7	Καρπενήσι	38.87	21.75	700	872.8	+1.12
8	Τρίκαλα	39.56	21.76	163	114.5	-0.32
9	Τρίστενο	39.79	21.00	940	980.7	+0.26
10	Βεγορίτιδα	40.84	21.83	647	623.3	-0.15
11	Βοβούσα	39.91	21.05	1024	1249.0	+1.46

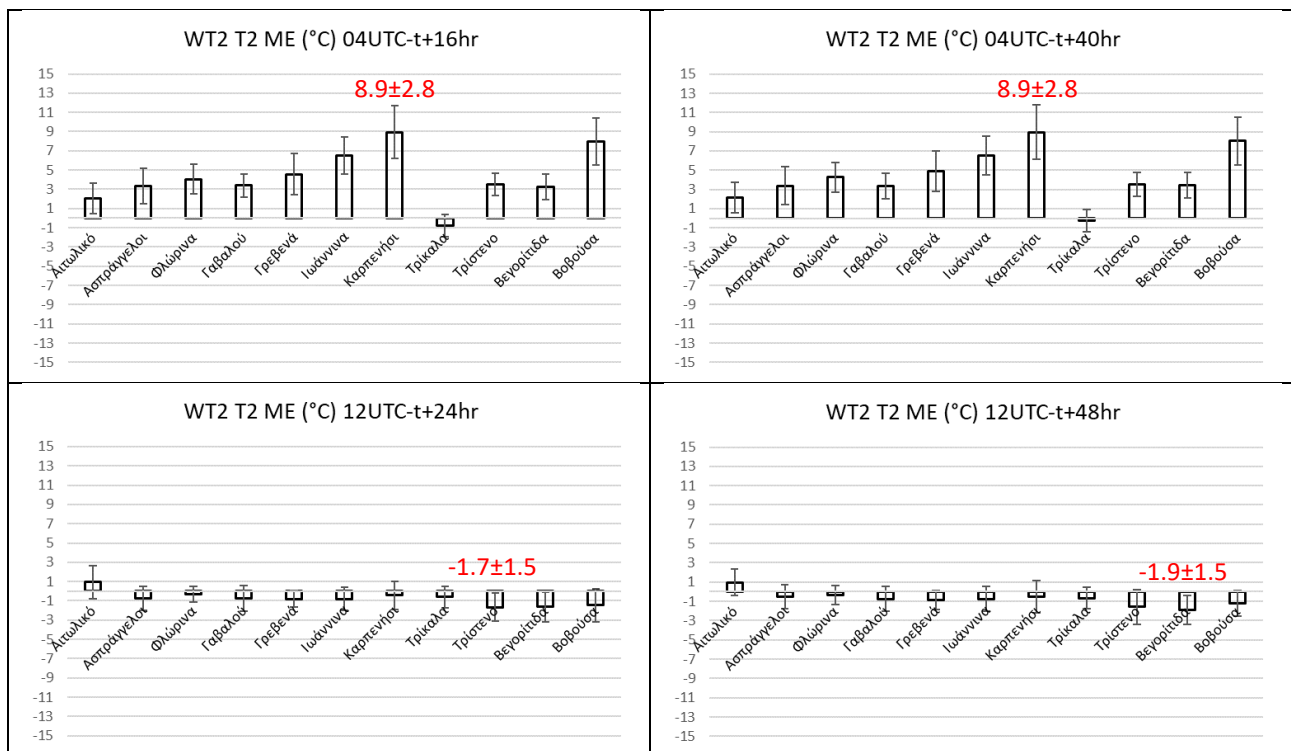
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13 για τον WT1 υπάρχει μεγάλη υπερεκτίμηση των θερμοκρασιών στις 04 UTC για κάποιους ορεινούς σταθμούς. Συγκεκριμένα, το μεγαλύτερο μέσο σφάλμα (ME) τιμών θερμοκρασίας εμφανίζει ο σταθμός στο Καρπενήσι με τις τιμές θερμοκρασίας να υπερεκτιμώνται από το μοντέλο περίπου κατά 7.5°C για την πρώτη και δεύτερη ημέρα πρόγνωσης, εμφανίζοντας επίσης μεγάλες τιμές τυπικών αποκλίσεων από το ME. Επίσης μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές θερμοκρασίας, με τιμές περίπου 5.0°C εμφανίζονται και στους σταθμούς Βοβούσα, Ιωάννινα και Γρεβενά. Όσον αφορά τις αποκλίσεις τιμών θερμοκρασιών στις 12 UTC, εμφανίζονται μικρές τιμές ME, με τις μεγαλύτερες αποκλίσεις να παρατηρούνται στον σταθμό Αιτωλικό με τιμές ME γύρω στους 1.5°C. Γενικά το μοντέλο προβλέπει ικανοποιητικά τη θερμοκρασία στις 12 UTC για την πρώτη και δεύτερη ημέρα πρόγνωσης, αλλά έχει μεγάλες αστοχίες για τις 04 UTC και τις δυο ημέρες υπερεκτιμώντας κατά πολύ τις αντίστοιχες θερμοκρασίες.



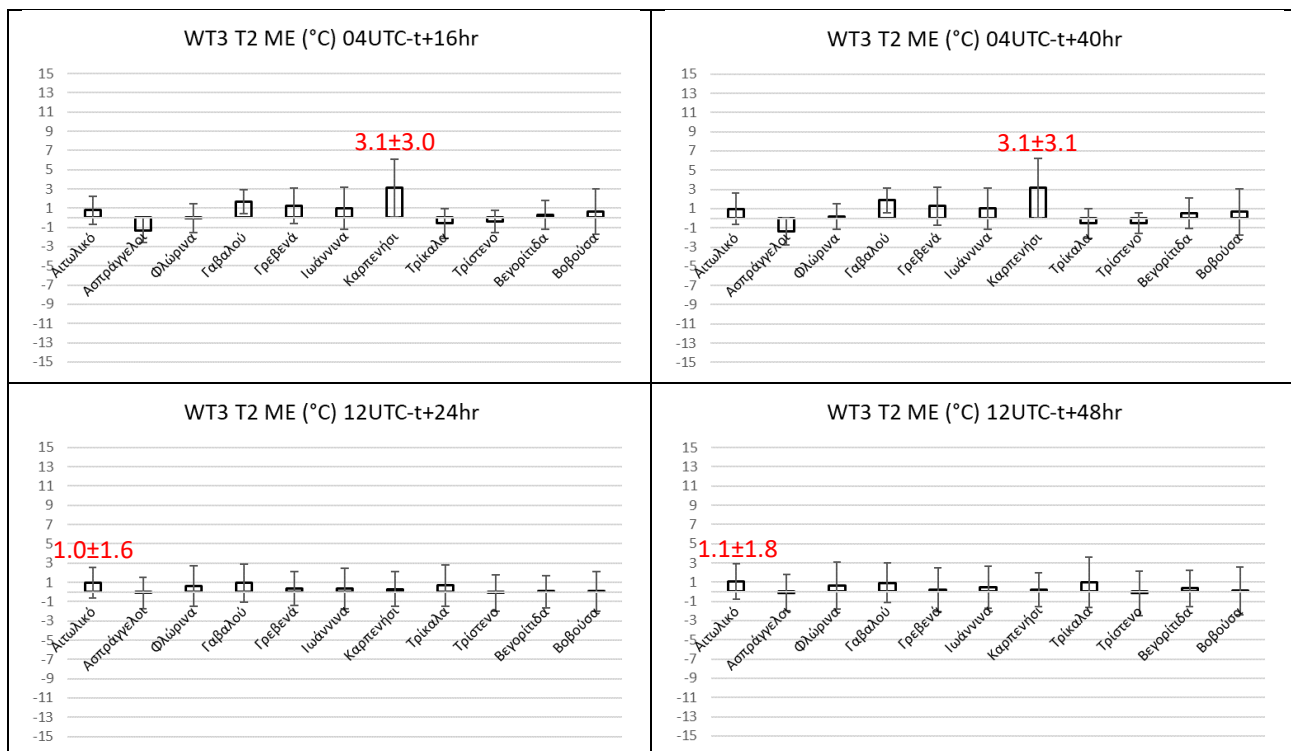
Σχήμα 3.13. Ιστογράμματα μέσων σφαλμάτων (ME) και τυπικών αποκλίσεων των μέσων σφαλμάτων των ζευγών τιμών πρόγνωσης – παρατήρησης θερμοκρασίας στα 2 μέτρα (T2) στις 04 UTC και 12 UTC για την πρώτη (t+16h και t+24h αντίστοιχα) και δεύτερη (t+40h και t+48h αντίστοιχα) ημέρα πρόγνωσης, για 11 μετεωρολογικούς σταθμούς για τον WT1. Επίσης, πάνω από τον σταθμό που εμφανίζει τις μεγαλύτερες αποκλίσεις τιμών κάθε φορά, σημειώνονται οι αντίστοιχες τιμές μέσου σφάλματος και τυπικής απόκλισης.

Από τα αποτελέσματα για τον WT2 (Σχήμα 3.14) παρατηρείται μεγάλη υπερεκτίμηση των θερμοκρασιών στις 04 UTC σε συγκεκριμένους σταθμούς. Ειδικότερα, οι μεγαλύτερες αποκλίσεις τιμών θερμοκρασίας εμφανίζονται στον σταθμό Καρπενησίου με τη θερμοκρασία να υπερεκτιμάται από το μοντέλο κατά 8.9°C για την πρώτη και δεύτερη ημέρα πρόγνωσης. Επίσης μεγάλες αποκλίσεις θερμοκρασιών παρατηρούνται στους σταθμούς Βοβούσα, Ιωάννινα και Γρεβενά με μειούμενες τιμές αντίστοιχα. Για τον WT2 εμφανίζονται μικρές τιμές στις αποκλίσεις τιμών θερμοκρασιών στις 12 UTC, με τα μεγαλύτερα ME θερμοκρασιών να παρατηρούνται στους σταθμούς Τρίστενο και Βεγορίτιδα με τιμές -1.7°C και -1.9°C αντίστοιχα.

Για τον WT3 (Σχήμα 3.15) παρατηρείται ότι το μοντέλο προβλέπει ικανοποιητικά τη θερμοκρασία στις 04 UTC και 12 UTC. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις στις τιμές θερμοκρασίας στις 04 UTC παρατηρούνται για ακόμα μια φορά στον σταθμό του Καρπενησίου με τιμή γύρω στους 3.1°C για την πρώτη και δεύτερη ημέρα πρόγνωσης, ενώ στις 12 UTC το μεγαλύτερο ME παρατηρείται στον σταθμό Αιτωλικό με τιμή περίπου 1.0°C.



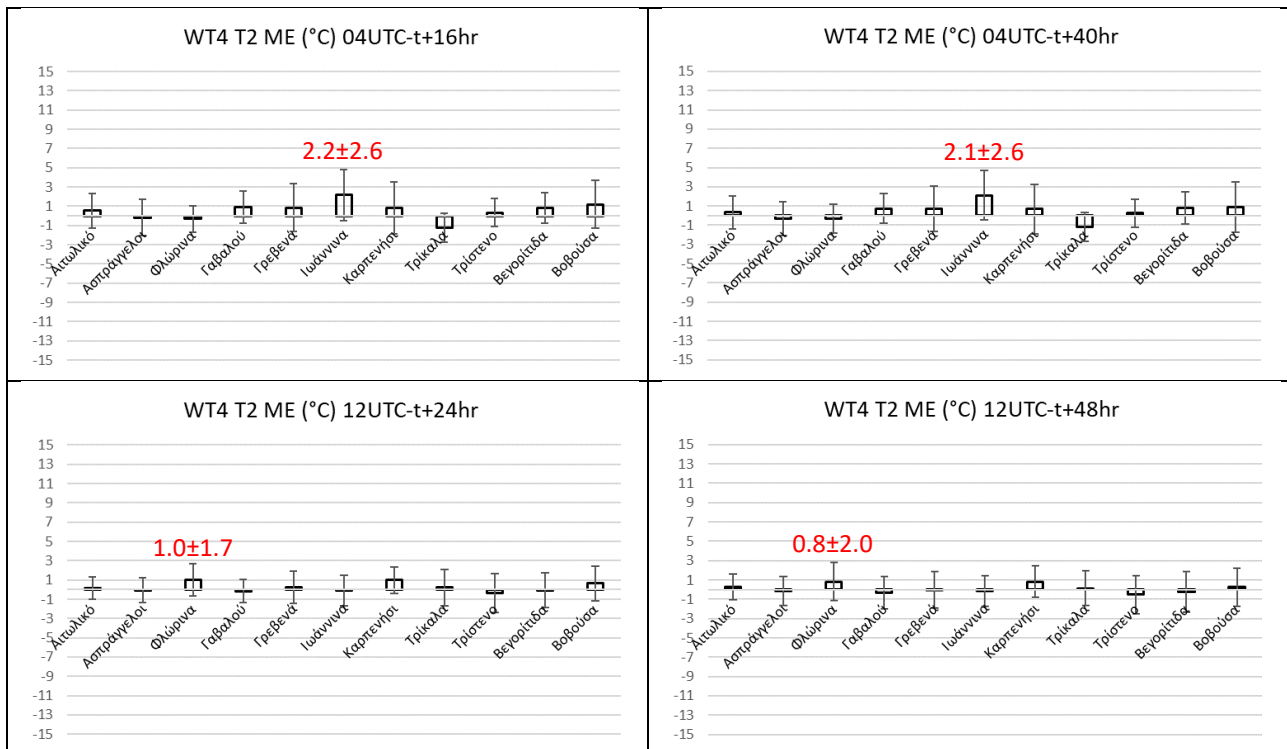
Σχήμα 3.14. Όπως στο Σχήμα 3.13, αλλά για τον WT2.



Σχήμα 3.15. Όπως στο Σχήμα 3.13, αλλά για τον WT3.

Σχετικά καλές τιμές πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC και 12 UTC από το μοντέλο παρατηρούνται και για τον WT4 (Σχήμα 3.16). Τα μεγαλύτερα ME θερμοκρασιών για τις 04 UTC παρατηρούνται στον σταθμό των Ιωαννίνων, με τιμές γύρω στους 2.2°C για την πρώτη και δεύτερη

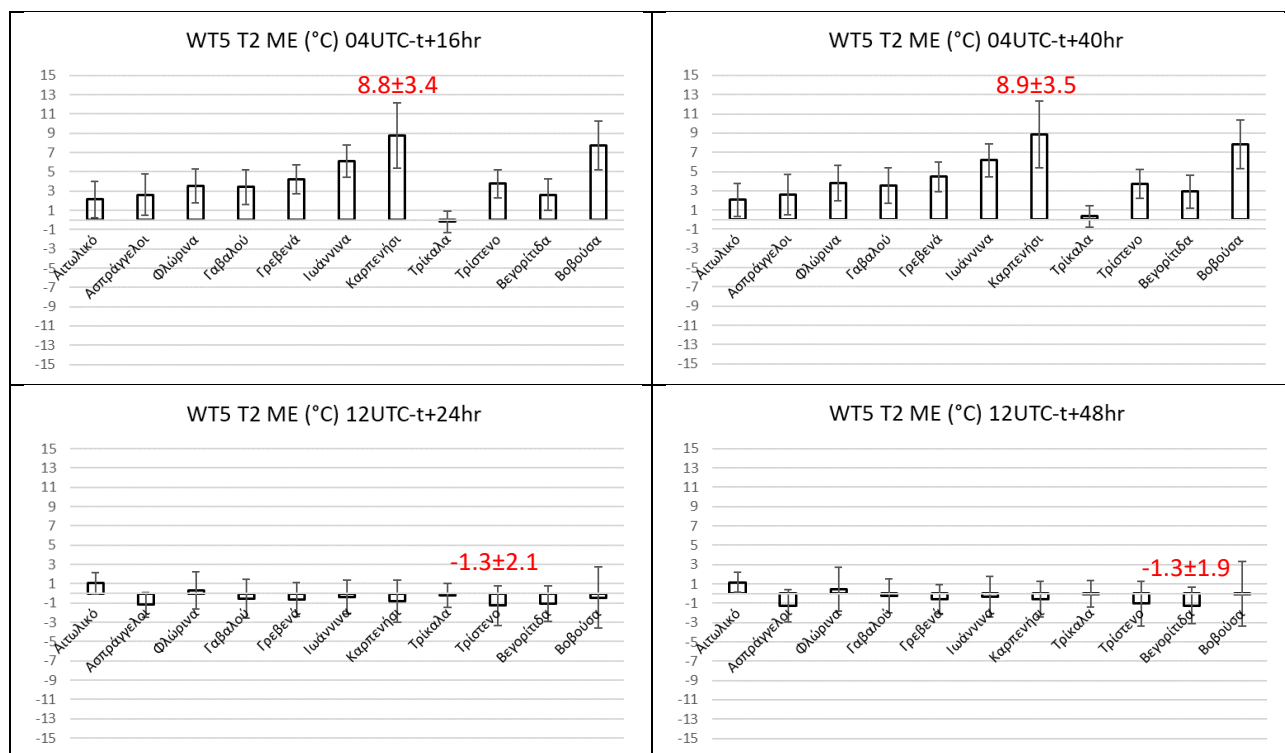
ημέρα πρόγνωσης, ενώ για τις 12 UTC παρατηρούνται στον σταθμό της Φλώρινας με τιμή γύρω στους 1.0°C.



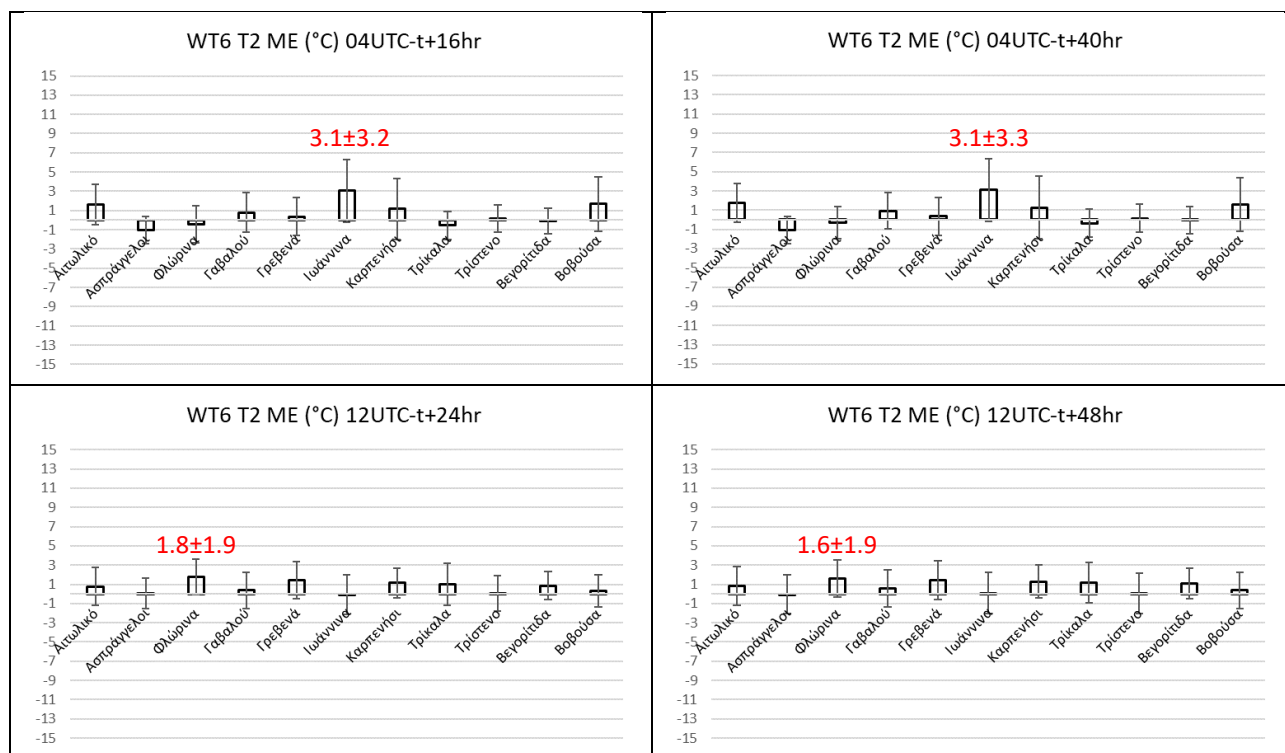
Σχήμα 3.16. Όπως στο Σχήμα 3.13, αλλά για τον WT4.

Από τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον WT5 (Σχήμα 3.17) παρατηρείται μεγάλη υπερεκτίμηση των θερμοκρασιών στις 04 UTC σε κάποιους σταθμούς. Συγκεκριμένα, το μεγαλύτερο ME τιμών θερμοκρασίας εμφανίζει ο σταθμός στο Καρπενήσι με τη θερμοκρασία να υπερεκτιμάται από το μοντέλο κατά περίπου 8.8°C για την πρώτη και δεύτερη ημέρα πρόγνωσης, εμφανίζοντας επίσης μεγάλες τιμές τυπικών αποκλίσεων περίπου 3.5°C από το ME. Επίσης μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές θερμοκρασίας εμφανίζονται και στους σταθμούς Βοβούσα και Ιωάννινα με τιμές περίπου 7.8°C και 6.1°C αντίστοιχα. Όσον αφορά τις αποκλίσεις τιμών θερμοκρασιών στις 12 UTC, εμφανίζονται μικρές τιμές ME, με τις μεγαλύτερες αποκλίσεις να παρατηρούνται στους σταθμούς Τρίστενο και Βεγορίτιδα με τιμές ME γύρω στους -1.3°C.

Για τον WT6 (Σχήμα 3.18) παρατηρείται ότι το μοντέλο προβλέπει σχετικά καλά τη θερμοκρασία στις 04 UTC και 12 UTC, με εξαίρεση για τον σταθμό Ιωαννίνων, ο οποίος εμφανίζει τις μεγαλύτερες αποκλίσεις θερμοκρασίας στις 04 UTC με τιμή ME γύρω στους 3.1°C για την πρώτη και δεύτερη ημέρα πρόγνωσης και μεγάλες τιμές τυπικών αποκλίσεων περίπου 3.2°C από το ME. Στις 12 UTC το μεγαλύτερο ME θερμοκρασίας παρατηρείται στον σταθμό Φλώρινα με τιμή περίπου 1.8°C.



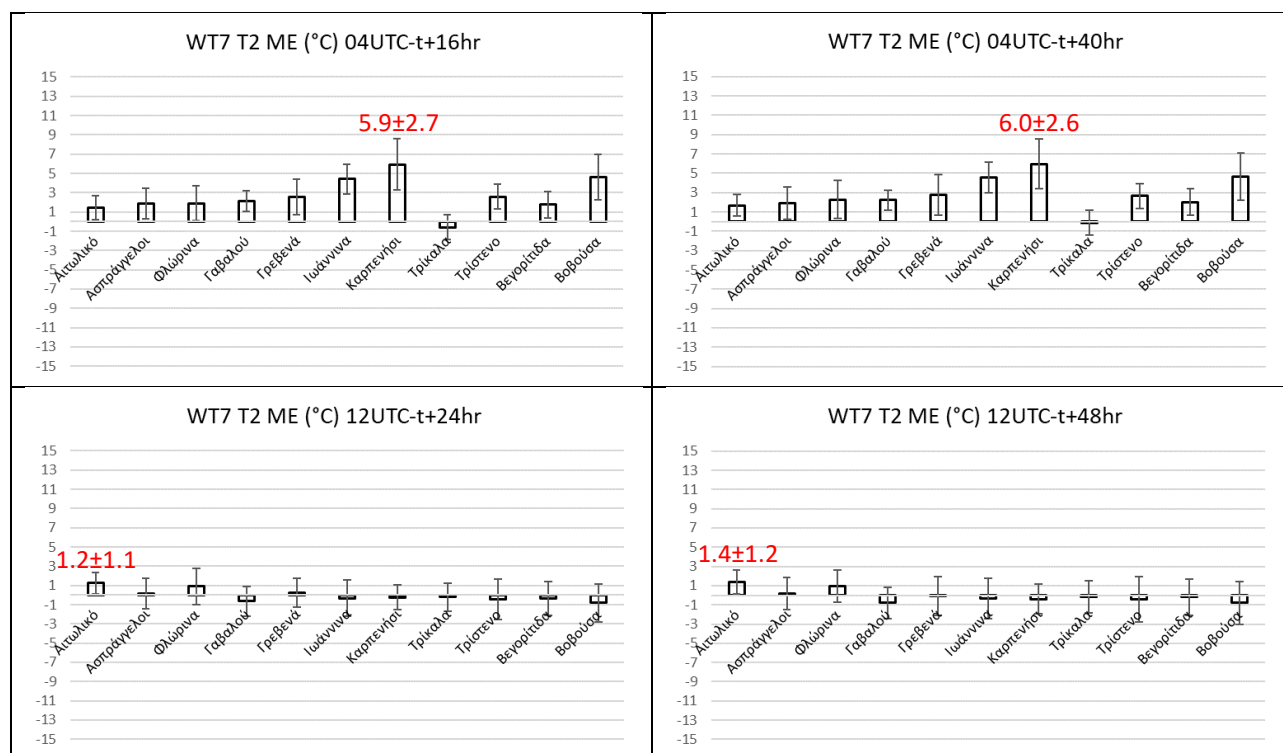
Σχήμα 3.17. Όπως στο Σχήμα 3.13, αλλά για τον WT5.



Σχήμα 3.18. Όπως στο Σχήμα 3.13, αλλά για τον WT6.

Από τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον WT7 (Σχήμα 3.19) παρατηρείται υπερεκτίμηση των θερμοκρασιών στις 04 UTC στους σταθμούς Καρπενήσι, Βοβούσα και Ιωάννινα με τιμές ME θερμοκρασίας 5.9°C, 4.6°C και 4.4°C αντίστοιχα για την πρώτη ημέρα πρόγνωσης.

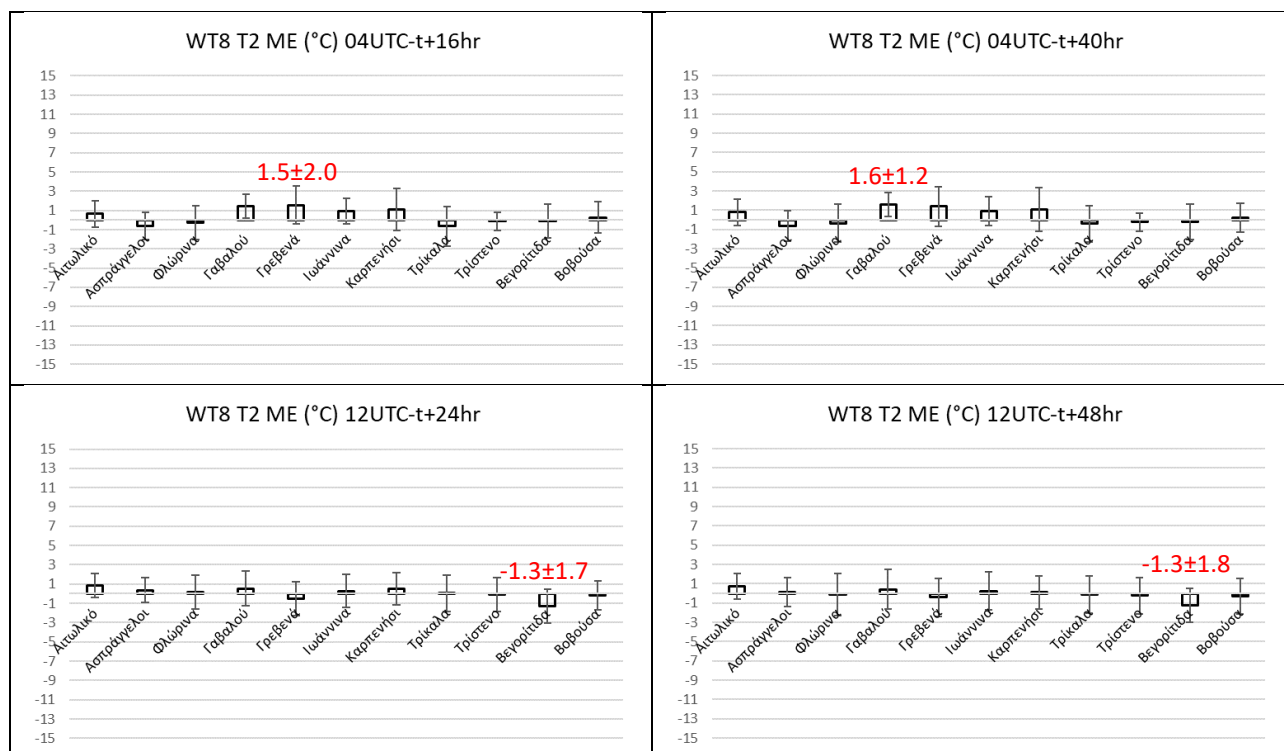
Όσον αφορά τις αποκλίσεις τιμών θερμοκρασιών στις 12 UTC, εμφανίζονται μικρές τιμές ME, με τις μεγαλύτερες αποκλίσεις να παρατηρούνται στον σταθμό Αιτωλικό με τιμές ME γύρω στους 1.3°C.



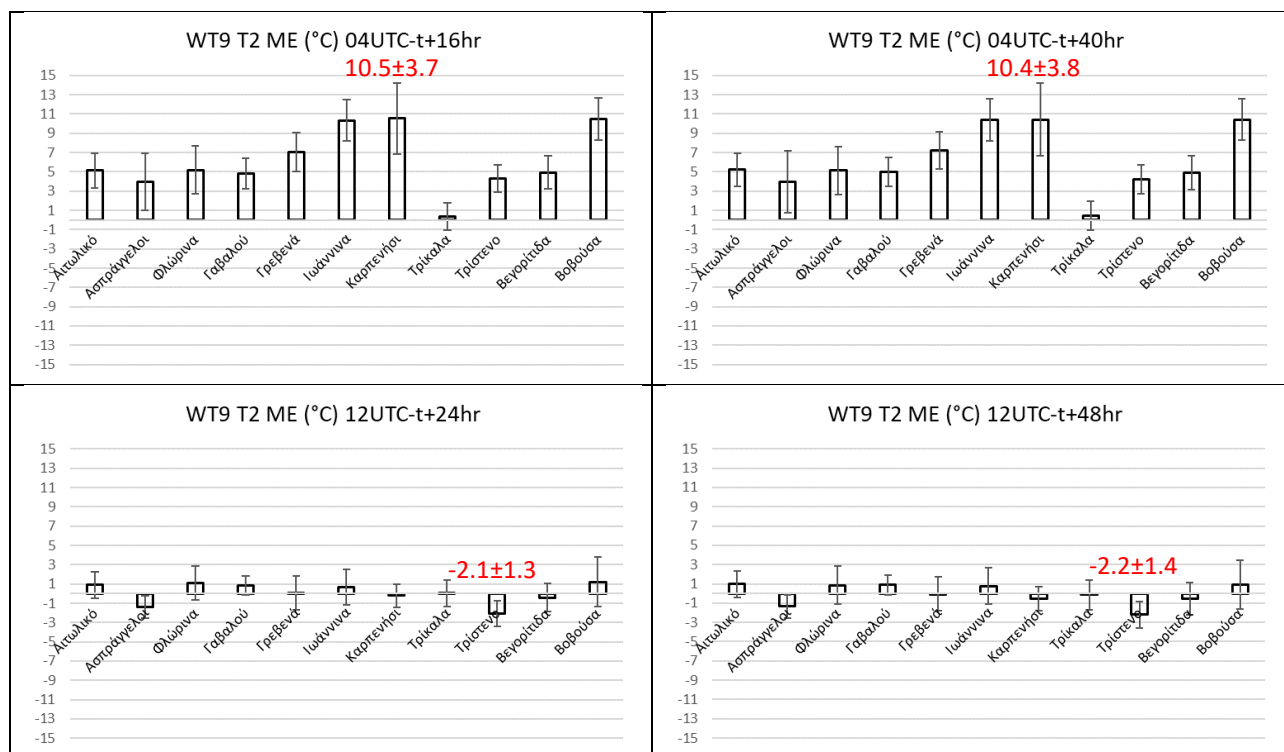
Σχήμα 3.19. Όπως στο Σχήμα 3.13, αλλά για τον WT7.

Καλές τιμές πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC και 12 UTC από το μοντέλο παρατηρούνται για τον WT8 (Σχήμα 3.20). Τα μεγαλύτερα ME θερμοκρασιών για τις 04 UTC παρατηρούνται στους σταθμούς Γρεβενά και Γαβαλού με τιμές γύρω στους 1.5°C για την πρώτη και δεύτερη ημέρα πρόγνωσης, ενώ για τις 12 UTC παρατηρούνται στον σταθμό Βεγορίτιδα με τιμή γύρω στους -1.3°C.

Από τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον WT9 (Σχήμα 3.21) παρατηρείται μεγάλη υπερεκτίμηση των θερμοκρασιών στις 04 UTC σε όλους σχεδόν τους σταθμούς, εκτός του σταθμού Τρικάλων, και εν γένη δυσκολία προσομοίωσης των ακριβών θερμοκρασιών στις 04 UTC από το μοντέλο λόγω των μεγάλων τιμών τυπικών αποκλίσεων από το ME που παρατηρούνται. Συγκεκριμένα, το μεγαλύτερο ME τιμών θερμοκρασίας εμφανίζει ο σταθμός στο Καρπενήσι με τη θερμοκρασία να υπερεκτιμάται από το μοντέλο κατά περίπου 10.5°C για την πρώτη και δεύτερη ημέρα πρόγνωσης, εμφανίζοντας επίσης μεγάλες τιμές τυπικών αποκλίσεων περίπου 3.7°C από το ME. Μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές θερμοκρασίας εμφανίζονται και στους σταθμούς Βοβούσα, Ιωάννινα και Γρεβενά με τιμές ME 10.5°C, 10.3°C και 7.1°C αντίστοιχα, για την πρώτη ημέρα πρόγνωσης. Επίσης παρατηρούνται μικρές τιμές ME στις 12 UTC, με τις μεγαλύτερες αποκλίσεις να παρουσιάζονται στον σταθμό Τρίστενο με τιμή γύρω στους -2.1°C.



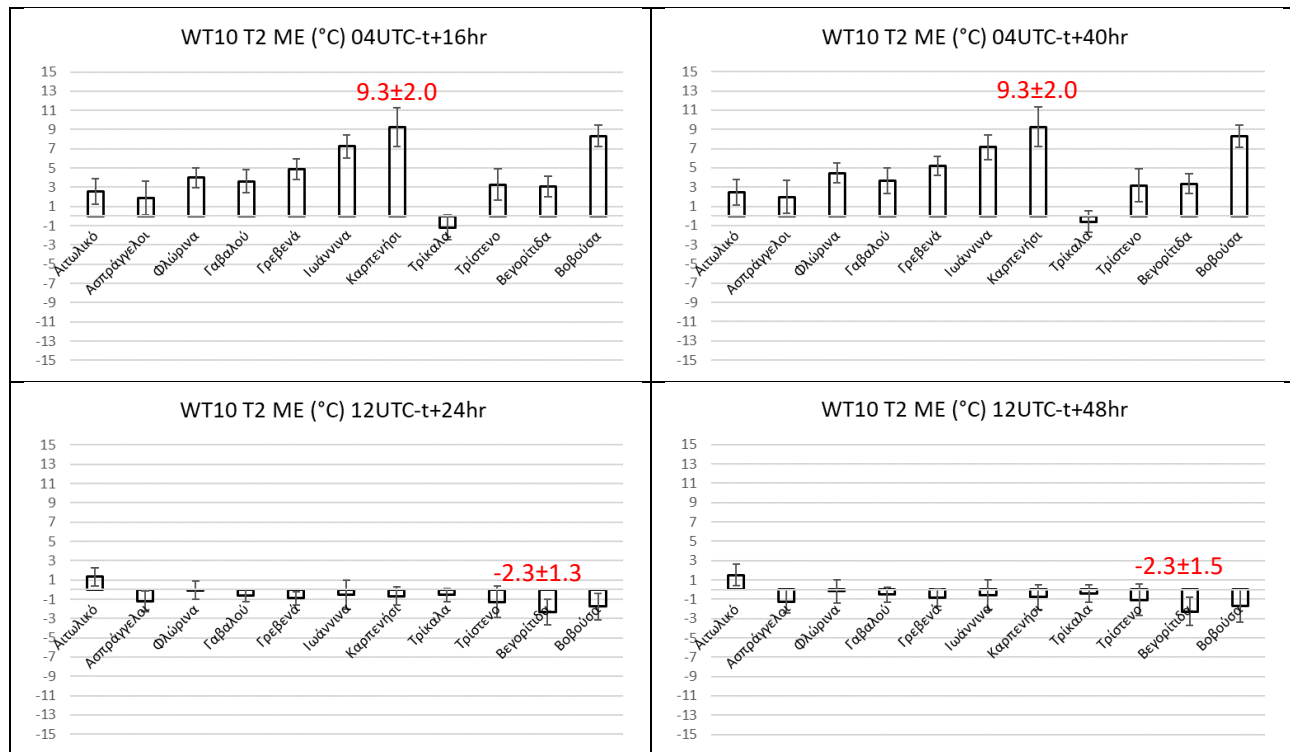
Σχήμα 3.20. Όπως στο Σχήμα 3.13, αλλά για τον WT8.



Σχήμα 3.21. Όπως στο Σχήμα 3.13, αλλά για τον WT9.

Για τον WT10 (Σχήμα 3.22), όπως και προηγουμένως, παρατηρείται μεγάλη υπερεκτίμηση των θερμοκρασιών στις 04 UTC σε όλους σχεδόν τους σταθμούς, εκτός του σταθμού των Τρικάλων. Το μεγαλύτερο μέσο σφάλμα τιμών θερμοκρασίας εμφανίζει για ακόμη μια φορά ο σταθμός του

Καρπενησίου με τη θερμοκρασία να υπερεκτιμάται από το μοντέλο κατά 9.3°C για την πρώτη και δεύτερη ημέρα πρόγνωσης. Μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές θερμοκρασίας εμφανίζονται και στους σταθμούς Βοβούσα, Ιωάννινα και Γρεβενά με τιμές ME 8.3°C , 7.3°C και 4.9°C αντίστοιχα, για την πρώτη ημέρα πρόγνωσης. Ακόμη, παρατηρούνται γενικά μικρές τιμές ME στις 12 UTC, με τις μεγαλύτερες αποκλίσεις να παρουσιάζονται στον σταθμό Βεγορίτιδα με τιμή γύρω στους -2.3°C .



Σχήμα 3.22. Όπως στο Σχήμα 3.13, αλλά για τον WT10.

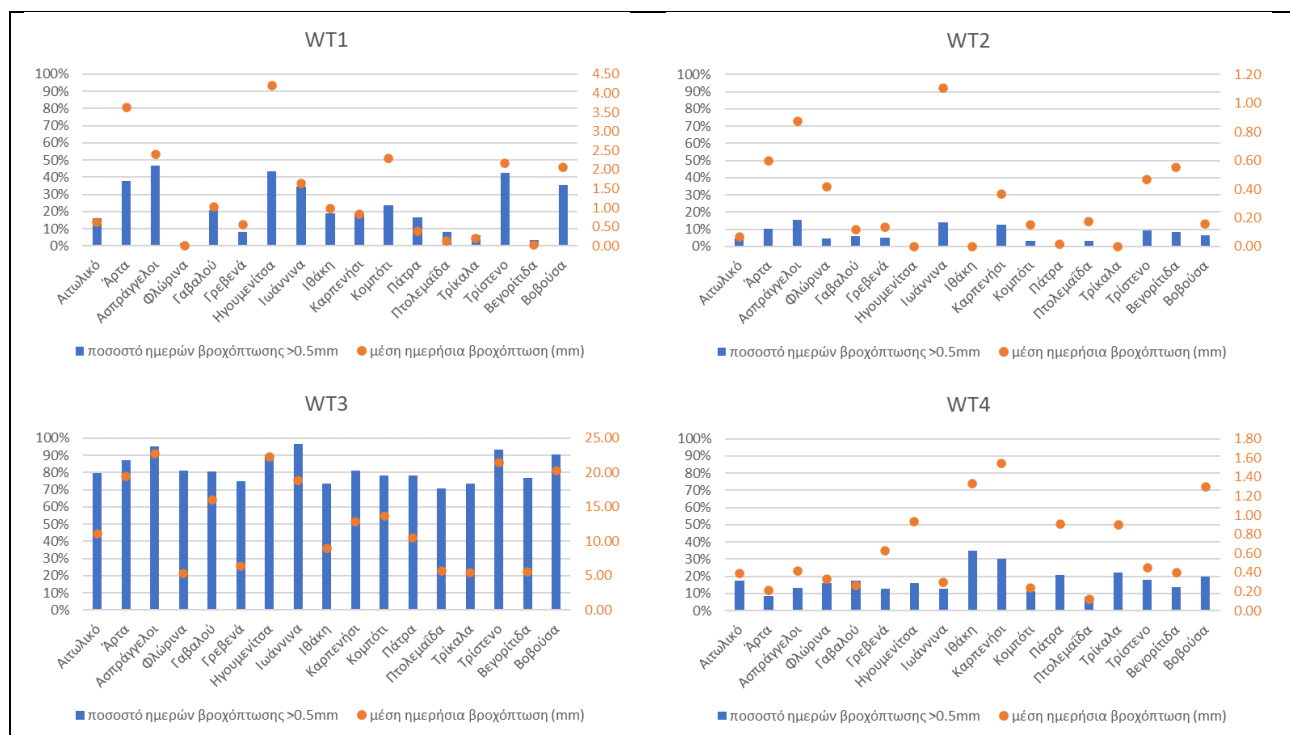
Συνοψίζοντας για τα αποτελέσματα αξιολόγησης των προγνωστικών τιμών θερμοκρασίας, τα μεγαλύτερα σφάλματα παρατηρούνται για τους WT9, WT10, WT5, WT2, WT1 και WT7 με φθίνουσα σειρά εμφάνισης τιμών σφαλμάτων, και για τους μετεωρολογικούς σταθμούς Καρπενησίου, Βοβούσας και Ιωαννίνων, υποδεικνύοντας ότι το μοντέλο υπερεκτιμά σημαντικά τη θερμοκρασία αέρα στα 2 μέτρα στις 04 UTC για τους αναφερόμενους WTs. Κοινό χαρακτηριστικό των αναφερόμενων WTs είναι οι πολύ μικρές τιμές ταχύτητας ανέμου (σχεδόν άπνοιας) στις 06 UTC και οι ιδιαίτερα χαμηλές τιμές νεφοκάλυψης στις 00 UTC και 06 UTC, κυρίως στους WT9, WT10 και WT5 (βλέπε Παράρτημα Α). Σε έρευνα αξιολόγησης του υετού και της θερμοκρασίας (Teklay et al., 2019) βρέθηκε υπερεκτίμηση της ελάχιστης θερμοκρασίας, για όλες τις πειραματικές αλλαγές παραμετροποιήσεων του μοντέλου WRF, από 0.20°C έως 1.35°C , επίσης στη χρονική διακύμανση των ελαχίστων θερμοκρασιών παρατηρήθηκε έντονη τάση υπερεκτίμησης των τιμών για αρκετές χρονικές περιόδους και ιδιαίτερα στις φυσικές παραμετροποιήσεις του μοντέλου που χρησιμοποιούν την παραμετροποίηση της επιφάνειας του εδάφους (land surface parameterization) Noah, όπως χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή. Σε άλλη έρευνα (Zhang et al., 2020), βρέθηκε ότι κατά τη διάρκεια εμφάνισης ομίχλης ακτινοβολίας, που εμφανίζεται συχνά σε ορεινές περιοχές, η θερμοκρασία κοντά στην επιφάνεια του WRF μοντέλου, που είναι πιο ευαίσθητη στην παραμετροποίηση της επιφάνειας του εδάφους, τείνει να υπερεκτιμά τη θερμοκρασία που παρατηρείται. Η μεγαλύτερη υπερεκτίμηση της θερμοκρασίας κοντά στην επιφάνεια συμβαίνει για

τη διαμόρφωση του WRF που χρησιμοποιεί την παραμετροποίηση της επιφάνειας του εδάφους Noah, σε σχέση με άλλες που δοκιμάστηκαν στην αναφερόμενη έρευνα. Ο μετεωρολογικός σταθμός των Ιωαννίνων βρίσκεται σε μια περιοχή που παρουσιάζει μεγάλο ετήσιο αριθμό γεγονότων ομίχλης (Houssos et al., 2012), η πλειονότητα των οποίων συμβαίνει κατά τις πρώτες πρωινές ώρες, επηρεάζοντας σε μεγάλο βαθμό τις προβλεπόμενες πρωινές θερμοκρασίες. Επίσης, μια έρευνα (Bessagnet et al., 2020) έδειξε ότι το μοντέλο WRF υπερεκτιμά τις θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της νύχτας και των πρώτων πρωινών ωρών σε περιπτώσεις ισχυρών θερμικών αναστροφών. Γενικά, φαίνεται ότι το μοντέλο WRF, με τις προεπιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις, αποτυγχάνει να προβλέψει σωστά τις πρωινές θερμικές αναστροφές. Αντίθετα, οι υπόλοιποι τύποι καιρού που παρουσιάζουν χαμηλά σφάλματα στη θερμοκρασία αέρα στις 04 UTC σχετίζονται με μεγάλη νεφοκάλυψη ή/και μεγάλες ταχύτητες ανέμου κοντά στο έδαφος, συνθήκες οι οποίες ως γνωστόν δεν ευνοούν τις επιφανειακές αναστροφές θερμοκρασίας.

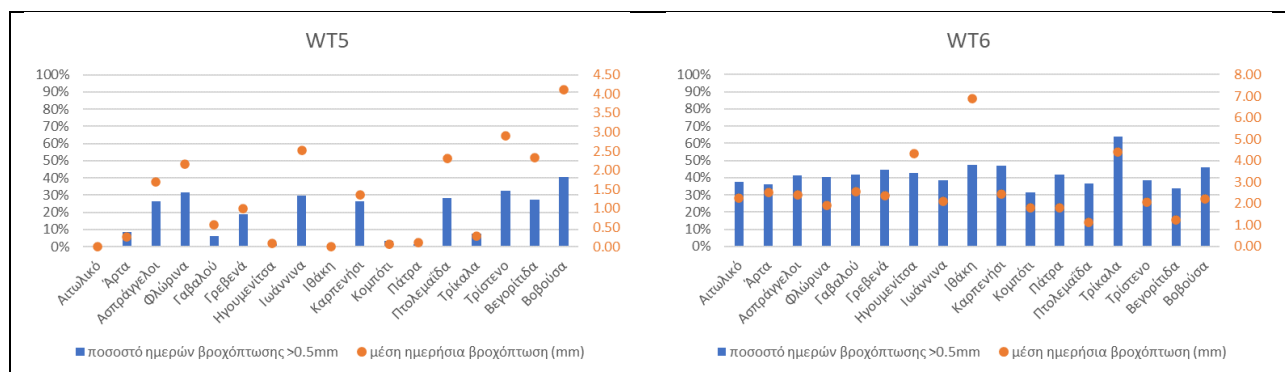
Λεπτομέρειες σχετικά με το σύνολο των γραφημάτων διασποράς των τιμών θερμοκρασίας για τα ζεύγη τιμών πρόγνωσης – παρατήρησης, για όλες τις χρονικές στιγμές πρόγνωσης που μελετώνται, καθώς και για όλους τους WTs και τους μετεωρολογικούς σταθμούς, παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β. Σε κάθε γράφημα υπολογίζεται η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων και οι αντίστοιχοι συντελεστές.

3.3 Αξιολόγηση προγνωστικών τιμών υετού

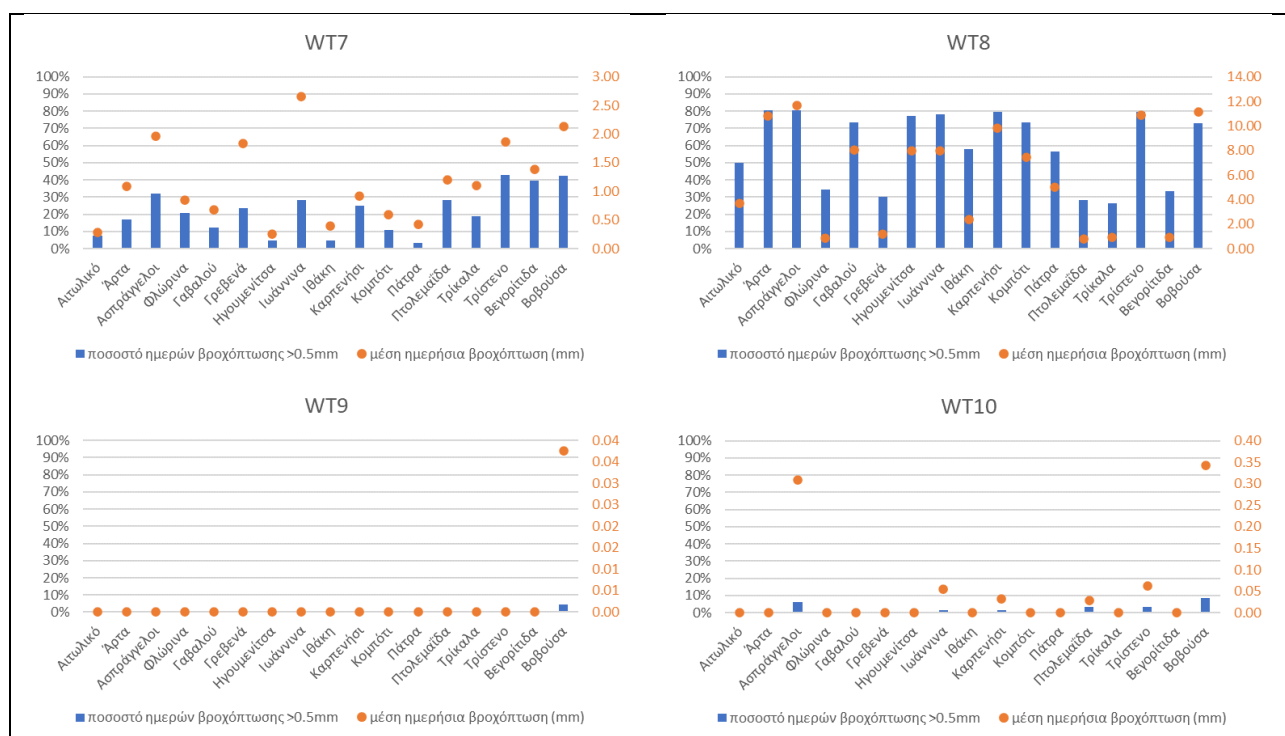
Για την αξιολόγηση των προγνωστικών τιμών του υετού, ξεχωριστά για κάθε WT, θα πρέπει να εξεταστούν τα χαρακτηριστικά υετού που παρατηρούνται για κάθε WT βάσει των παρατηρήσεων. Με αυτό τον τρόπο θα αναδειχθούν οι WT που εμφανίζουν κάποιες αξιόλογες τιμές υετού έτσι ώστε να αξιολογηθούν και οι αντίστοιχες προγνώσεις από το μοντέλο. Στα Σχήματα 3.23 – 3.25 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά υετού για κάθε WT βάσει των παρατηρήσεων για 17 μετεωρολογικούς σταθμούς, και συγκεκριμένα το ποσοστό ημερών βροχόπτωσης (τιμές $>0.5\text{mm}$) στις ημέρες μελέτης (64 συνολικά, εκτός αν υπάρχει απώλεια δεδομένων ημέρας) και η μέση ημερήσια βροχόπτωση σε mm. Να σημειωθεί ότι η μέση ημερήσια βροχόπτωση υπολογίζεται ως το άθροισμα των ημερήσιων τιμών υετού σε κάθε σταθμό διαιρούμενο με τον αριθμό των ημερών μελέτης, όπως προηγουμένως. Ακόμη, στους Πίνακες 3.3 και 3.4 παρουσιάζεται το πλήθος ημερήσιων συμβάντων υετού, για συγκεκριμένα διαστήματα ημερήσιων τιμών υετού (P), που παρατηρούνται σε κάθε έναν WT για το σύνολο των 17 μετεωρολογικών σταθμών. Ο λόγος που παρουσιάζονται τα συμβάντα υετού σε διαστήματα και κατώφλια ημερήσιων τιμών υετού είναι για τη σωστή αποτίμηση των αποτελεσμάτων στατιστικών και συναρτήσεων επίδοσης, οι οποίες υπολογίζονται σχετικά. Να σημειωθεί ότι σε ιδανικές συνθήκες (χωρίς απώλεια ημερήσιων παρατηρήσεων υετού) ο μέγιστος αριθμός συμβάντων για κάθε WT ισούται με 1088 ($64 \text{ ημέρες} \times 17 \text{ σταθμοί} = 1088 \text{ συμβάντα υετού}$). Ο αριθμός αυτός αφορά την ιδανική περίπτωση που για κάποιον WT, παρατηρούνται καθημερινά (για 64 ημέρες) τιμές υετού σε όλους τους μετεωρολογικούς σταθμούς.



Σχήμα 3.23. Ιστογράμματα ποσοστού ημερών βροχόπτωσης και μέσης ημερήσιας βροχόπτωσης για 17 μετεωρολογικούς σταθμούς για τους WT1, WT2, WT3 και WT4.



Σχήμα 3.24. Όπως στο Σχήμα 3.23, αλλά για τους WT5 και WT6.



Σχήμα 3.25. Όπως στο Σχήμα 3.23, αλλά για τους WT7, WT8, WT9 και WT10.

Πίνακας 3.3. Κατανομή συμβάντων νετού σε εύρη τιμών.

	>0.5 P <2.5mm	≥2.5 P <5.0mm	≥5.0 P <10.0mm	≥10.0 P <20.0mm	P ≥20.0mm
WT1	110	46	39	29	12
WT2	39	8	7	9	3
WT3	112	100	178	238	257
WT4	96	47	27	8	4
WT5	71	30	34	29	17
WT6	186	90	95	41	33
WT7	94	48	50	30	8
WT8	161	120	135	137	79
WT9	3	0	0	0	0
WT10	9	1	5	0	0

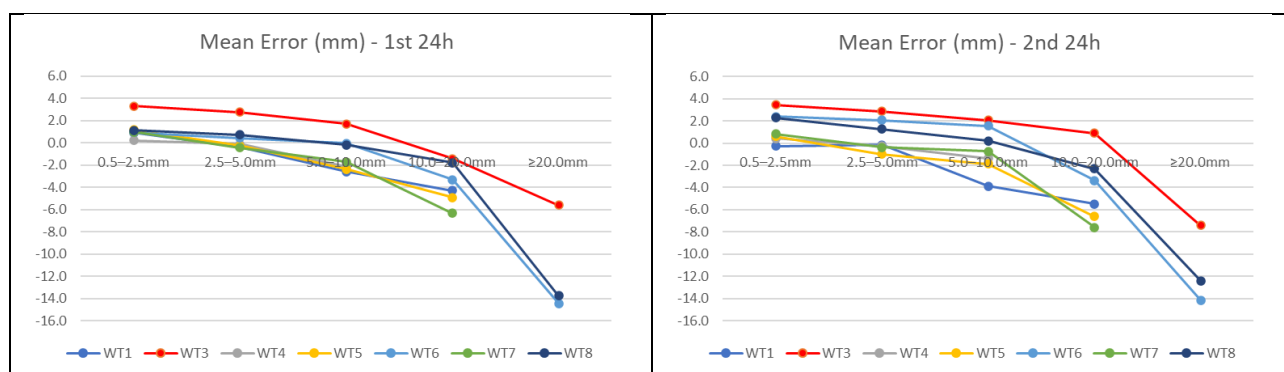
Πίνακας 3.4. Κατανομή συμβάντων υετού σε κατώφλια.

	≥0.5mm	≥2.5mm	≥5.0mm	≥10mm	≥20mm
WT1	236	126	80	41	12
WT2	66	27	19	12	3
WT3	885	773	673	495	257
WT4	182	86	39	12	4
WT5	181	110	80	46	17
WT6	445	259	169	74	33
WT7	230	136	88	38	8
WT8	632	471	351	216	79
WT9	3	0	0	0	0
WT10	15	6	5	0	0

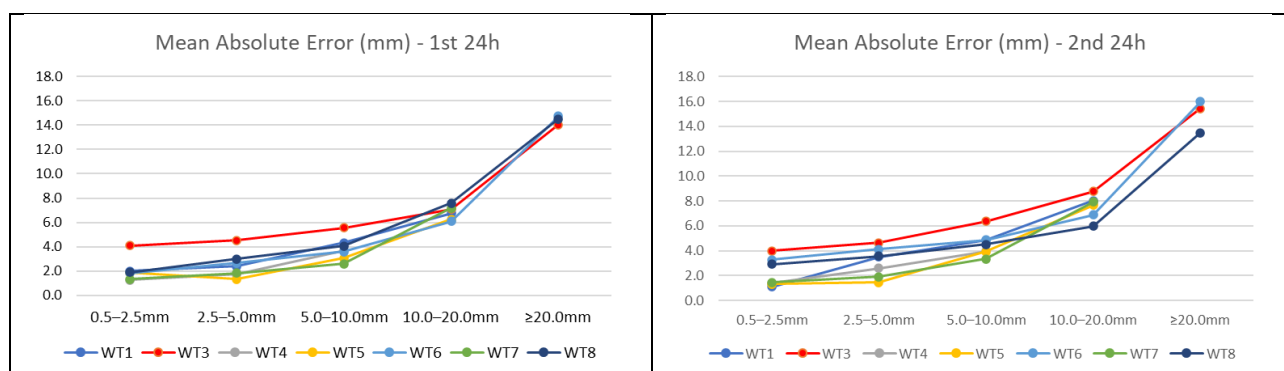
Όπως είναι εμφανές από τα Σχήματα 3.23 – 3.25, ο WT με το μεγαλύτερο ποσοστό ημερών βροχόπτωσης, όπως επίσης και με τα μεγαλύτερα ύψη βροχής σε όλους τους μετεωρολογικούς σταθμούς είναι ο WT3, με τις τιμές της μέσης ημερήσιας βροχόπτωσης να ξεπερνούν τα 20mm σε αρκετούς σταθμούς. Λόγω των υψηλών τιμών υετού που παρατηρούνται στον WT3 μπορούμε να τον θεωρήσουμε ως έναν WT κατάλληλο για την έρευνα περιπτωσιολογικών μελετών υετού στην περιοχή της ΒΔ Ελλάδας (π.χ. Sindosi et al., 2012). Οι WT που παρουσιάζουν επίσης μεγάλα ποσοστά ημερών βροχόπτωσης και τιμών μέσης ημερήσιας βροχόπτωσης είναι ο WT8 και ο WT6. Στην αντίθετη περίπτωση των WTs με τα λιγότερα συμβάντα υετού, όπως φαίνεται και στους Πίνακες 3.3 και 3.4, κατατάσσονται οι WT9, WT10 και WT2. Οι συγκεκριμένοι WTs δε λαμβάνονται υπόψη για τη μελέτη αξιολόγησης προγνωστικών τιμών υετού. Να σημειωθεί επίσης ότι η κατανομή των συμβάντων υετού για κάθε WT, που εξετάστηκε, δεν επιτρέπει την επιμέρους ομαδοποίηση μετεωρολογικών σταθμών ανάλογα π.χ. με τη γεωγραφική κατανομή ή το υψόμετρο τους και για αυτό η αξιολόγηση γίνεται για το σύνολο των σταθμών για κάθε WT. Αυτό συμβαίνει γιατί μια κοινή συμπεριφορά ομάδων μετεωρολογικών σταθμών (π.χ. παραθαλάσσιοι, πεδινοί, ορεινοί) που μπορεί να εμφανίζεται σε συγκεκριμένο WT δεν εμφανίζει σημεία ομοιότητας με άλλους WTs, έτσι ώστε να υπάρξει κοινή αντιμετώπιση ομαδοποιημένων σταθμών για όλους του WTs. Δηλαδή, σε συγκεκριμένους WTs το κριτήριο για την ομαδοποίηση των μετεωρολογικών σταθμών μπορεί να είναι η γεωγραφική κατανομή των σταθμών (ανατολικά ή δυτικά της οροσειράς της Πίνδου), σε άλλους WTs το κριτήριο μπορεί να είναι το υψόμετρο ενώ σε άλλους WTs δε φαίνεται να υπάρχει κάποιο σαφές κριτήριο ομαδοποίησης των μετεωρολογικών σταθμών. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2.2.6, για την αξιολόγηση των προγνωστικών τιμών υετού υπολογίζονται οι στατιστικές συναρτήσεις που βασίζονται σε κατηγορίες ημερήσιων προγνωστικών τιμών υετού και οι συναρτήσεις επίδοσης που βασίζονται στους υπολογισμούς πινάκων συνάφειας, χρησιμοποιώντας κατώφλια ημερήσιων τιμών υετού. Στα Σχήματα 3.26, 3.27 και 3.28 παρουσιάζονται οι στατιστικές συναρτήσεις ME, MAE και RMSE αντίστοιχα για την πρώτη (αθροιστικές τιμές υετού P, από t+12h έως t+36h) και δεύτερη (αθροιστικές τιμές υετού P, από t+36h έως t+60h) ημέρα πρόγνωσης για πέντε κατηγορίες (κλάσεις): (α) 0.5–2.5mm, (β) 2.5–5.0mm, (γ) 5.0–10.0mm, (δ) 10.0–20.0mm και (ε) ≥20.0mm για τους WTs που παρουσιάζουν αξιόλογες τιμές υετού, οι οποίες εκφράζουν τιμές σφαλμάτων που προκύπτουν από τη σύγκριση τιμών πρόγνωσης – παρατήρησης. Ακόμη, στα Σχήματα 3.29 – 3.34 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις επίδοσης FBI, PC, POD, FAR, CSI και GSS, οι οποίες υπολογίζονται χρησιμοποιώντας πίνακες συνάφειας για πέντε κατώφλια υετού α) >0.5mm, β) ≥2.5mm, γ) ≥5.0mm, δ) ≥10.0mm, και ε) ≥20.0mm. Αυτές οι συναρτήσεις χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της επίδοσης του μοντέλου ως προς τις ημερήσιες τιμές υετού. Η αξιολόγηση της

επίδοσης του μοντέλου μέσω των συναρτήσεων επίδοσης συνίσταται στην ποσοτικοποίηση της επιτυχίας ή αποτυχίας στην πρόγνωση ενός δυαδικού γεγονότος, που στην περίπτωση μας είναι ένα συμβάν υετού για συγκεκριμένο κατώφλι. Επίσης παρουσιάζεται και ο ΣΔ, ο οποίος συνοψίζει τα αποτελέσματα των πέντε συναρτήσεων επίδοσης, όπως ορίζεται από την Εξίσωση 2.28.

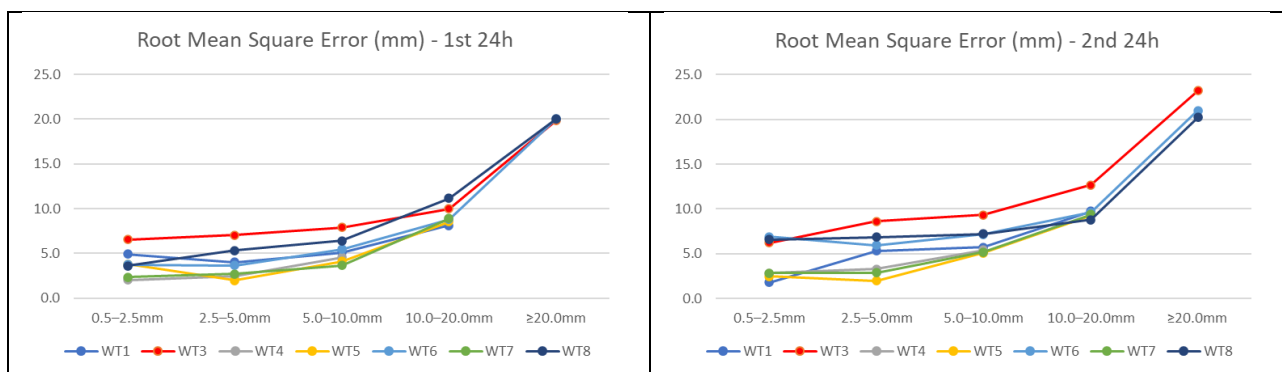
Όπως παρατηρείται από τα Σχήματα 3.26 – 3.28, υπάρχουν αξιόλογες διαφορές στις τιμές που εμφανίζονται μεταξύ των WTs, οι οποίες σχετίζονται προφανώς με τους μηχανισμούς που προκαλούν κάθε φορά ένα συμβάν υετού, όπως επίσης και με το ποσό υετού που εμφανίζεται σε κάθε έναν WT. Για παράδειγμα, ο υετός που παρατηρείται στους WT5 και WT7, οι οποίοι ανήκουν στη θερμή περίοδο του έτους, οφείλεται κυρίως στην αστάθεια της ατμόσφαιρας που προκαλείται από έντονη θέρμανση του εδάφους τις μεσημβρινές ώρες, σε αντίθεση με τους υπόλοιπους WT, οι οποίοι ανήκουν στην ψυχρή περίοδο του έτους και τα συμβάντα υετού που εμφανίζονται σε αυτούς οφείλονται κατά κύριο λόγο στην παρουσία βαρομετρικών συστημάτων στην περιοχή. Γενικά, τα μικρότερα σφάλματα εμφανίζονται για τις μικρότερες κλάσεις υετού, ενώ τα μεγαλύτερα σφάλματα για τις μεγαλύτερες κλάσεις υετού. Επίσης, τα μικρότερα σφάλματα εμφανίζονται κατά την πρώτη (t+12h έως t+36h) ημέρα πρόγνωσης με λίγες εξαιρέσεις όπως, ο WT1 και ο WT5 που παρουσιάζουν μικρότερα σφάλματα (ME, MAE, RMSE) κατά την δεύτερη (t+36h έως t+60h) ημέρα πρόγνωσης για την κλάση υετού 0.5mm – 2.5mm, και ο WT8 που παρουσιάζει μικρότερα σφάλματα (MAE) κατά την δεύτερη ημέρα πρόγνωσης για τις κλάσεις υετού 10.0mm – 20.0mm και ≥ 20.0 mm.



Σχήμα 3.26. Γραφική απεικόνιση του ME (mm) των τιμών πρόγνωσης – παρατήρησης 24ώρου υετού, για την πρώτη (t+12h έως t+36h) και δεύτερη (t+36h έως t+60h) ημέρα πρόγνωσης για κάθε WT και για πέντε κλάσεις υετού.

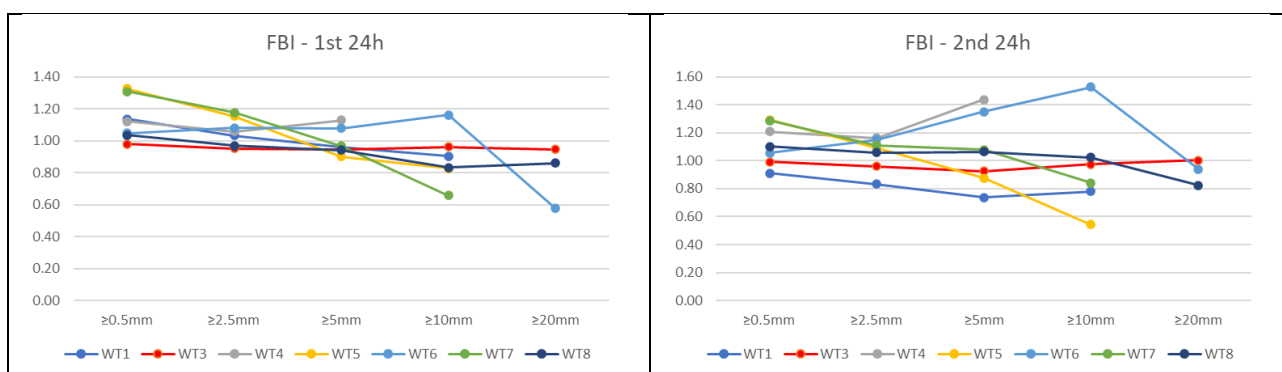


Σχήμα 3.27. Όπως στο Σχήμα 3.26, αλλά για τις τιμές του MAE (mm).



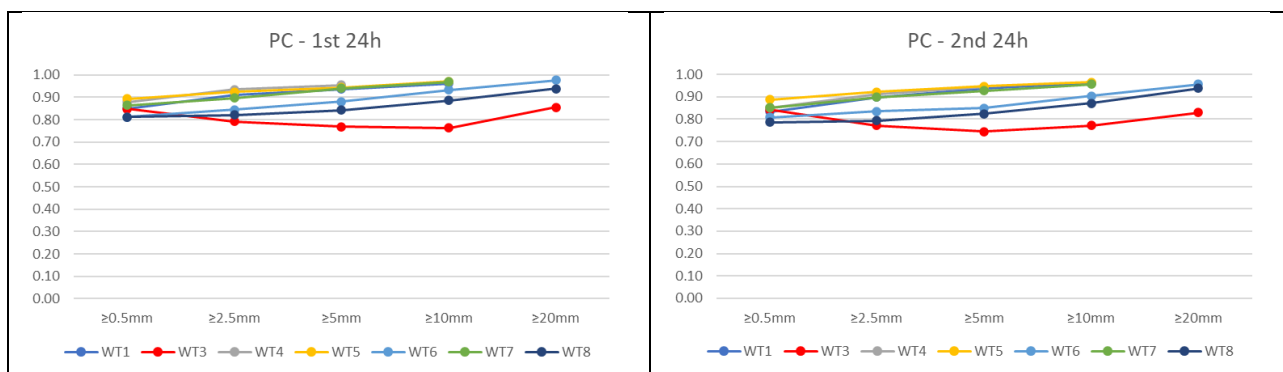
Σχήμα 3.28. Όπως στο Σχήμα 3.26, αλλά για τις τιμές του RMSE (mm).

Τα αποτελέσματα του δείκτη FBI (Σχήμα 3.29) δείχνουν μια σαφή διαφοροποίηση τιμών ανάλογα με τον WT, γενικά όμως παρατηρείται μια υπερεκτίμηση του υετού από το μοντέλο στα δυο πρώτα κατώφλια υετού (>0.5 mm και ≥ 2.5 mm) για την πλειονότητα των WTs κατά την πρώτη ημέρα πρόγνωσης, ενώ αυτή η εικόνα αλλάζει σε υποεκτίμηση του υετού όταν επικεντρωνόμαστε σε υψηλότερα κατώφλια υετού (π.χ. ≥ 10 mm και ≥ 20 mm). Για τη δεύτερη ημέρα πρόγνωσης, η διαφοροποίηση τιμών ανάλογα τον WT γίνεται πιο εμφανής, χωρίς να ακολουθείται ένα κοινό πρότυπο. Για παράδειγμα στον WT4 η βροχόπτωση υπερεκτιμάται από το μοντέλο σε όλα τα κατώφλια υετού ενώ στον WT1 η βροχόπτωση υποεκτιμάται από το μοντέλο σε όλα τα κατώφλια. Ο WT3 παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα του δείκτη FBI με τις τιμές του να βρίσκονται κοντά στο 1 για όλα τα κατώφλια και για την πρώτη και για την δεύτερη ημέρα πρόγνωσης.



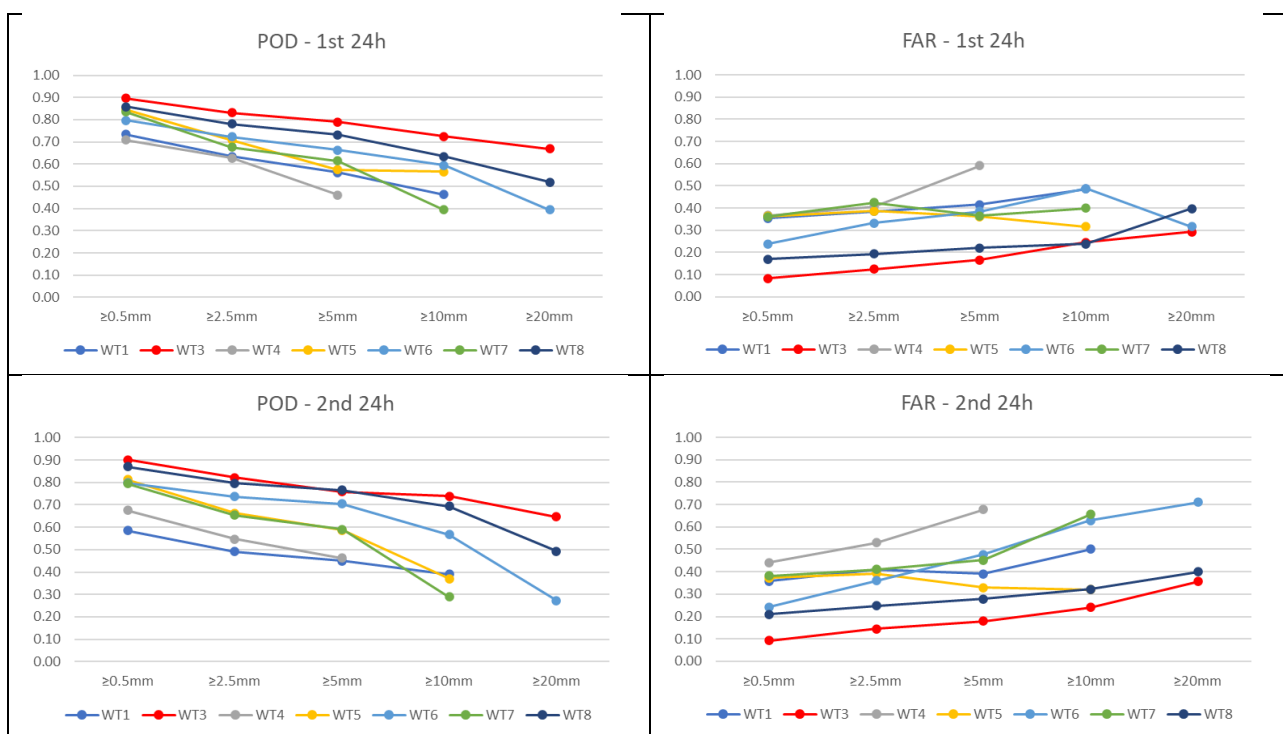
Σχήμα 3.29. Γραφική απεικόνιση του δείκτη FBI για την πρώτη (t+12h έως t+36h) και δεύτερη (t+36h έως t+60h) ημέρα πρόγνωσης για κάθε WT και για πέντε κατώφλια υετού.

Τα αποτελέσματα της συνάρτησης επίδοσης PC (Σχήμα 3.30) εμφανίζουν μια ομοιότητα στις καμπύλες για όλους του WTs κατά την πρώτη και δεύτερη ημέρα πρόγνωσης και εμφανείς διαφοροποιήσεις ανάλογα τον WT κάθε φορά. Εμφανίζεται μια γενικευμένη εικόνα βελτίωσης των αποτελεσμάτων όσο αυξάνεται το κατώφλι υετού, με τις τιμές της συνάρτησης επίδοσης να προσεγγίζει την τιμή 1 για κάποιους WTs. Οι καλύτερες επιδόσεις της PC παρατηρούνται για τον WT5 σε όλα σχεδόν τα κατώφλια ενώ οι χειρότερες επιδόσεις παρατηρούνται για τον WT3 στα κατώφλια υετού από ≥ 2.5 mm και πάνω. Όπως έχει ήδη αναφερθεί για την PC δε γίνεται διαχωρισμός των ορθώς προβλεπόμενων γεγονότων από τις ορθές απορρίψεις με αποτέλεσμα η τιμή του να επηρεάζεται πολύ από το πιο συχνό συμβάν, που για τον WT5 είναι το γεγονός των περισσότερων ημερών ανομβρίας σε σχέση με τους άλλους WTs.



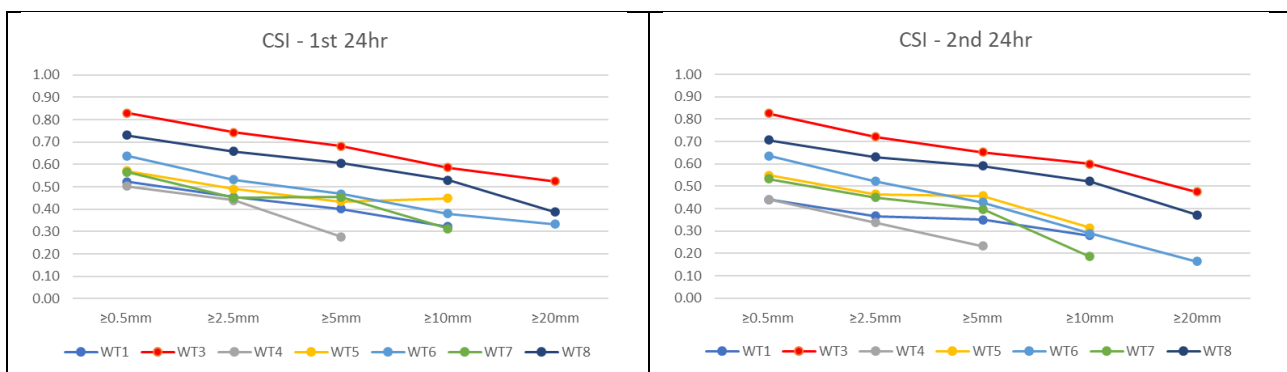
Σχήμα 3.30. Όπως στο Σχήμα 3.29, αλλά για τη συνάρτηση επίδοσης PC.

Από τα αποτελέσματα των συναρτήσεων επίδοσης POD και FAR (Σχήμα 3.31) είναι εμφανές ότι παρουσιάζεται γενικά μια εικόνα μείωσης της ικανότητας πρόγνωσης υετού από το μοντέλο και ταυτόχρονα μιας γενικευμένης αύξησης των λανθασμένων προγνώσεων συμβάντων υετού από το μοντέλο όσο μεγαλύτερο είναι το κατώφλι υετού, για όλους σχεδόν τους WTs στην πρώτη αλλά και στη δεύτερη ημέρα πρόγνωσης. Επίσης, εμφανίζονται μεγάλες διαφοροποιήσεις στις τιμές των POD και FAR ανάμεσα στους WTs, οι οποίες γίνονται πιο έντονες κατά τη δεύτερη ημέρα πρόγνωσης. Καλύτερη ικανότητα πρόγνωσης υετού από το μοντέλο παρουσιάζεται για τον WT3 σχεδόν σε όλα τα κατώφλια για την πρώτη και δεύτερη ημέρα πρόγνωσης. Για τον WT3 παρατηρούνται επίσης και οι λιγότερες λανθασμένες προγνώσεις βροχόπτωσης από το μοντέλο σχεδόν σε όλα τα κατώφλια για την πρώτη και δεύτερη ημέρα πρόγνωσης. Επίσης και για τον WT8 το μοντέλο παρουσιάζει καλή ικανότητα πρόγνωσης υετού με τις τιμές των POD και FAR να βρίσκονται αρκετά κοντά σε αυτές του WT3. Η χειρότερη ικανότητα πρόγνωσης υετού από το μοντέλο παρατηρείται για τον WT4 κατά την πρώτη ημέρα πρόγνωσης σε όλα τα κατώφλια υετού, ενώ ταυτόχρονα για τον WT4 παρατηρούνται και οι περισσότερες λανθασμένες προγνώσεις υετού από το μοντέλο σχεδόν σε όλα τα κατώφλια στην πρώτη και δεύτερη ημέρα πρόγνωσης.



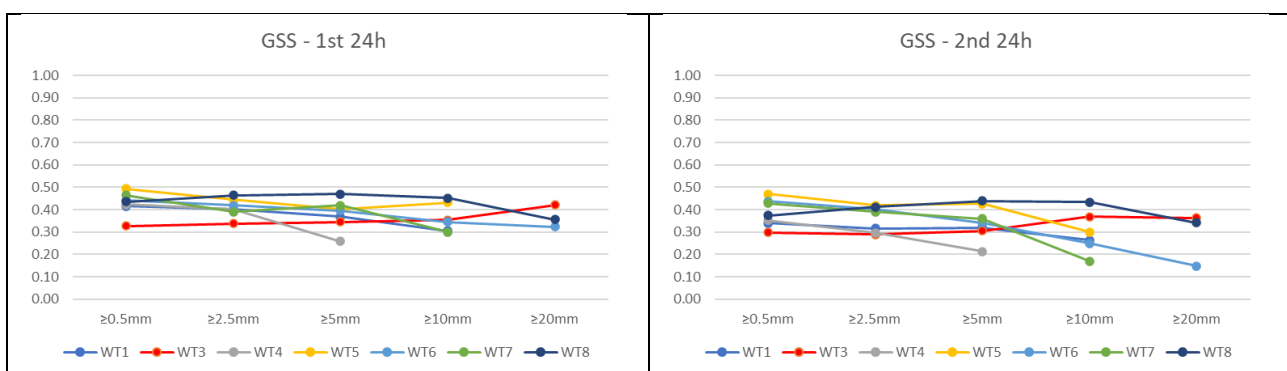
Σχήμα 3.31. Όπως στο Σχήμα 3.29, αλλά για τις συναρτήσεις επίδοσης POD και FAR.

Τα αποτελέσματα της συνάρτησης επίδοσης CSI (Σχήμα 3.32) δείχνουν μια εικόνα μείωσης της ικανότητας πρόγνωσης υετού από το μοντέλο όσο μεγαλύτερο είναι το κατώφλι υετού, για όλους σχεδόν τους WTs στην πρώτη αλλά και στη δεύτερη ημέρα πρόγνωσης, όπως παρατηρήθηκε και για τη συνάρτηση επίδοσης POD προηγουμένως. Επίσης, εμφανίζονται μεγάλες διαφοροποιήσεις στις τιμές της CSI ανάμεσα στους WTs, οι οποίες γίνονται πιο έντονες κατά τη δεύτερη ημέρα πρόγνωσης. Καλύτερη ικανότητα πρόγνωσης υετού από το μοντέλο παρουσιάζεται για τον WT3, με τον WT8 να ακολουθεί, σε όλα τα κατώφλια για την πρώτη και δεύτερη ημέρα πρόγνωσης, ενώ η χειρότερη ικανότητα πρόγνωσης υετού παρουσιάζεται για τον WT4 για όλα σχεδόν τα κατώφλια για την πρώτη και δεύτερη ημέρα πρόγνωσης.



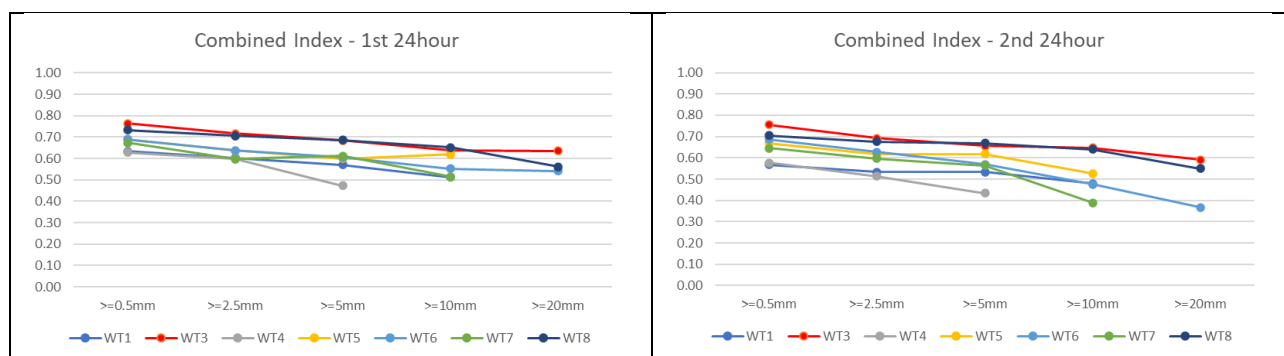
Σχήμα 3.32. Όπως στο Σχήμα 3.29, αλλά για τη συνάρτηση επίδοσης CSI.

Από τα αποτελέσματα της συνάρτησης επίδοσης GSS (Σχήμα 3.33) παρατηρούνται γενικά μικρές τιμές (<0.50) της συνάρτησης αυτής για όλους τους WTs και για όλα τα κατώφλια, με τις μικρότερες τιμές να παρατηρούνται τη δεύτερη ημέρα πρόγνωσης, υποδεικνύοντας γενικά μειωμένη ικανότητα πρόγνωσης υετού από το μοντέλο για όλους τους WTs, δεδομένου του ότι η βέλτιστη τιμή της GSS είναι ίση με 1. Επίσης μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις των τιμών της GSS ανάμεσα στους WTs παρατηρούνται κατά τη δεύτερη ημέρα πρόγνωσης. Γενικά δεν παρατηρείται ένας WT που να υπερτερεί ή να υπολείπεται σαφώς όλων των άλλων σε όλα τα κατώφλια, αλλά μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι για τον WT8 το μοντέλο εμφανίζει ελαφρώς καλύτερη επίδοση στα κατώφλια υετού $\geq 2.5\text{mm}$, $\geq 5.0\text{mm}$ και $\geq 10.0\text{mm}$.



Σχήμα 3.33. Όπως στο Σχήμα 3.29, αλλά για τη συνάρτηση επίδοσης GSS.

Όπως παρατηρείται από τις συναρτήσεις επίδοσης που παρουσιάζονται παραπάνω, υπάρχουν αρκετές διαφοροποιήσεις των αποτελεσμάτων οι οποίες έχουν να κάνουν με τις ιδιαιτερότητες της κάθε μιας που σχετίζονται με τον ορισμό τους. Για τον λόγο αυτό, όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 2.2.6, εισάγουμε μια νέα συνάρτηση, τον Συνδυαστικό Δείκτη (Εξίσωση 2.28), που συνδυάζει πολλές συναρτήσεις επίδοσης μαζί έτσι ώστε να προκύψει μια συνολική εκτίμηση της ικανότητας πρόγνωσης υετού του μοντέλου, για κάθε WT και κάθε κατώφλι υετού. Επίσης, μπορεί να γίνει και μια συνολική σύγκριση αποτελεσμάτων, στην περίπτωση τροποποίησης των φυσικών παραμετροποιήσεων του μοντέλου, με στόχο τη συνολική βελτίωση πρόγνωσης του υετού. Τα αποτελέσματα του ΣΔ (Σχήμα 3.34) δείχνουν μια εικόνα μείωσης της ικανότητας πρόγνωσης υετού από το μοντέλο όσο μεγαλώνει το κατώφλι υετού, για όλους σχεδόν τους WTs στην πρώτη αλλά και στη δεύτερη ημέρα πρόγνωσης. Το μοντέλο προβλέπει καλύτερα τον υετό (υψηλότερες τιμές του δείκτη) την πρώτη ημέρα πρόγνωσης σχεδόν για όλους τους WTs και για όλα τα κατώφλια. Γενικά, εμφανίζονται διαφοροποιήσεις στις τιμές του ΣΔ ανάμεσα στους WTs, οι οποίες γίνονται πιο διακριτές κατά τη δεύτερη ημέρα πρόγνωσης. Ανάμεσα στους WTs, ο WT3 και ο WT8 εμφανίζουν καλύτερα αποτελέσματα για την πρώτη και τη δεύτερη ημέρα πρόγνωσης σχεδόν σε όλα τα κατώφλια, ενώ τα χειρότερα αποτελέσματα παρατηρούνται για τον WT4 για την πρώτη και τη δεύτερη ημέρα πρόγνωσης, σχεδόν σε όλα τα κατώφλια.



Σχήμα 3.34. Όπως στο Σχήμα 3.29, αλλά για τον ΣΔ.

Συνοψίζοντας για την ικανότητα πρόγνωσης υετού του μοντέλου ανάλογα τον WT, παρατηρείται μια καλύτερη προγνωστική επίδοση του μοντέλου στους WT3 και WT8 ενώ υπάρχει προγνωστική αδυναμία για τον WT4. Αξίζει να αναφερθεί ότι στους WT3 και WT8 επικρατεί κατά κύριο λόγο νοτιοδυτική επιφανειακή ροή (Σχήματα 3.5 και 3.10), ενώ στον WT4 επικρατούν επιφανειακοί άνεμοι κυρίως βορειοανατολικών διευθύνσεων (Σχήμα 3.6). Φαίνεται ότι υπάρχει μικρότερη αβεβαιότητα όταν οι βροχοπτώσεις στην περιοχή σχετίζονται με δραστηριότητα βαρομετρικών χαμηλών σε συνδυασμό με ορογραφικό εμπόδιο (οροσειρά της Πίνδου) που προκαλεί την ανύψωση των αέριων μαζών, ενώ η αβεβαιότητα είναι μεγαλύτερη όταν η ροή είναι βόρεια / βορειοανατολική και οι βροχοπτώσεις είναι κυρίως αποτέλεσμα υψηλής αστάθειας λόγω της παρουσίας ατμοσφαιρικής διαταραχής στην ανώτερη ατμόσφαιρα (δεδομένου ότι η βορειοανατολική ροή δε συμβάλλει σε υετό ορογραφικής προέλευσης). Όσον αφορά την ικανότητα πρόγνωσης των βροχοπτώσεων για τους WTs της θερμής περιόδου, μπορούν να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες από τα αποτελέσματα για τον WT5, ο οποίος παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές του CAPE σε ηπειρωτικές περιοχές (βλέπε Παράρτημα Α) και του WT7. Και οι δυο WTs χαρακτηρίζονται από επαρκή επεισόδια βροχοπτώσεων στα περισσότερα όρια. Πρέπει να αναφερθεί ότι τα επεισόδια βροχοπτώσεων κατά τη διάρκεια των WTs της θερμής περιόδου, τα οποία σχετίζονται κυρίως με

όμβρους ή καταιγίδες λόγω της θέρμανσης της ξηράς από την ηλιακή ακτινοβολία και της παρουσίας ψυχρών μαζών στην ανώτερη ατμόσφαιρα, εμφανίζονται κυρίως, αν όχι αποκλειστικά, σε ηπειρωτικούς σταθμούς. Για τους WTs της θερμής περιόδου, υπάρχει υπερεκτίμηση των βροχοπτώσεων από το μοντέλο στα χαμηλότερα κατώφλια υετού, ενώ στα υψηλότερα κατώφλια το μοντέλο τείνει να υποεκτιμά σημαντικά τις βροχοπτώσεις, με παρόμοια αποτελέσματα να έχουν βρεθεί και σε άλλες μελέτες (π.χ. Mazarakis et al., 2009). Με βάση τα αποτελέσματα του ΣΔ, το μοντέλο για τους WTs της θερμής περιόδου δεν παρουσιάζει ούτε εξαιρετική, αλλά ούτε και τη χειρότερη ικανότητα πρόγνωσης βροχοπτώσεων σε σύγκριση με τους WTs της ψυχρής περιόδου.

3.4 Αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας για διάφορες φυσικές παραμετροποιήσεις

Κατά τη διαδικασία αξιολόγησης των προγνωστικών τιμών θερμοκρασίας που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3.2, παρατηρήθηκαν μεγάλες αποκλίσεις στις προγνωστικές τιμές θερμοκρασίας σε συγκεκριμένους WTs και μετεωρολογικούς σταθμούς. Οι βασικές φυσικές παραμετροποιήσεις του μοντέλου WRF, με τις οποίες εκτελείται και επιχειρησιακά το μοντέλο για καθημερινή πρόγνωση καιρού στο Εργαστήριο Μετεωρολογίας του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των τιμών θερμοκρασίας αναφέρονται στον Πίνακα 2.6. Σε αυτό το μέρος της διατριβής παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας μελέτης που έχει ως σκοπό τη βελτίωση της πρόγνωσης της θερμοκρασίας σε συγκεκριμένους WTs κάνοντας αλλαγές στις βασικές φυσικές παραμετροποιήσεις του μοντέλου WRF.

Μια προκαταρκτική μελέτη, για την πλησιέστερη ημέρα στο κέντρο της συστάδας του WT9 (συχνότερα εμφανιζόμενος WT της ψυχρής περιόδου του έτους) και του WT10 (συχνότερα εμφανιζόμενος WT της θερμής περιόδου του έτους), ανέδειξε τις φυσικές παραμετροποιήσεις που έχουν τη μεγαλύτερη βελτίωση στις τιμές θερμοκρασίας. Οι WTs αυτοί επιλέχθηκαν διότι σε αυτούς παρατηρούνται οι μεγαλύτερες αποκλίσεις τιμών θερμοκρασίας. Οι φυσικές παραμετροποιήσεις που ελέγχθηκαν στην προκαταρκτική μελέτη αφορούν α) τις ακτινοβολίες μακρών και βραχέων κυμάτων, β) το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα σε συνδυασμό με το επιφανειακό στρώμα αέρος και την αλληλεπίδραση με το έδαφος, όπως μεταβάλλεται και από τις παραμέτρους του μοντέλου, και γ) την επιφάνεια του εδάφους. Μεταξύ των προαναφερόμενων φυσικών παραμετροποιήσεων, αυτή του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (ΑΟΣ) σε συνδυασμό με το επιφανειακό στρώμα αέρος και την αλληλεπίδραση με το έδαφος, παρουσίασε τη μεγαλύτερη επίδραση στις τιμές θερμοκρασίας και έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα, γεγονός που μας παρέχει ενδείξεις ότι στους WT9 και WT10 οι αποκλίσεις των τιμών θερμοκρασίας συμβαίνουν κυρίως λόγω της λανθασμένης προσομοίωσης των συνθηκών εντός του ΑΟΣ συμπεριλαμβανομένων των πιθανών αναστροφών θερμοκρασίας.

Για την τελική επιλογή αυτών των παραμετροποιήσεων ακολουθείται η εξής διαδικασία: Το μοντέλο WRF εκτελείται αλλάζοντας κάθε φορά κάποια από τις 29 φυσικές παραμετροποιήσεις (μεμονωμένα) για την πλησιέστερη ημέρα του WT9 και 20 φυσικές παραμετροποιήσεις (μεμονωμένα και συνδυαστικά) για την πλησιέστερη ημέρα του WT10. Στη συνέχεια, υπολογίζονται τα μέσα σφάλματα των θερμοκρασιών στις 04 UTC για τους 11 μετεωρολογικούς σταθμούς και στη συνέχεια υπολογίζεται η μέση απόλυτη τιμή των μέσων σφαλμάτων, για κάθε παραμετροποίηση. Αυτή η τιμή υπολογίζεται έτσι ώστε να εκφράζει ένα συνολικό σφάλμα που αντιστοιχεί σε μια παραμετροποίηση για τον κάθε WT (WT9 και WT10). Στη συνέχεια, για την τελική αξιολόγηση μιας παραμετροποίησης, υπολογίζεται η μέση σταθμισμένη τιμή των μέσων απόλυτων τιμών των WT9 και WT10, για κάθε κοινή παραμετροποίηση. Για τον υπολογισμό της σταθμισμένης τιμής γίνεται χρήση των ημερών εμφάνισης των WT9 και WT10 σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση: $(453 * \text{μέση απόλυτη τιμή WT9} + 640 * \text{μέση απόλυτη τιμή WT10}) / 1093$. Οι αριθμοί 453 και 640, στην αναφερόμενη σχέση, είναι ο αριθμός των ημερών εμφάνισης των WT9 και WT10 στη συνολική περίοδο μελέτης, αντίστοιχα. Στον Πίνακα 3.5 παρουσιάζονται οι μέσες απόλυτες τιμές (των μέσων σφαλμάτων) των WT9 και WT10 και οι σταθμισμένες τιμές (των μέσων απόλυτων τιμών) για τις 6 επιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις με τα μικρότερα σφάλματα.

Στον Πίνακα 2.7 αναφέρονται οι 6 φυσικές παραμετροποιήσεις που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη βελτίωσης των τιμών θερμοκρασίας από το μοντέλο. Για τη μελέτη αυτή το μοντέλο WRF εκτελείται κάθε φορά με τη χρήση μιας διαφορετικής φυσικής παραμετροποίησης για τις 6

πλησιέστερες ημέρες στο κέντρο κάθε συστάδας των WT1, WT2, WT5, WT7, WT9 και WT10. Οι αναφερόμενοι WTs είναι αυτοί με τα μεγαλύτερα εμφανιζόμενα σφάλματα στις αποκλίσεις τιμών θερμοκρασίας που παρατηρούνται στις 04 UTC. Η εκτέλεση του μοντέλου WRF, στη διαδικασία βελτιστοποίησης, γίνεται για τον έλεγχο των δεδομένων θερμοκρασίας πρόγνωσης της πρώτης ημέρας, δεδομένου ότι στα αποτελέσματα αξιολόγησης του μοντέλου δεν προέκυψε σημαντική διαφορά στις τιμές θερμοκρασίας σε σχέση με τη δεύτερη ημέρα πρόγνωσης. Όπως και προηγουμένως, ο υπολογισμός του μέσου σφάλματος (ME) και της τυπικής απόκλιση αυτού γίνεται για τα ζεύγη τιμών θερμοκρασιών (6 για κάθε WT, αν δεν υπάρχει απώλεια δεδομένων) σε κάθε μετεωρολογικό σταθμό που μελετάται και για κάθε WT από τους αναφερόμενους. Θετικές τιμές του ME υποδεικνύουν υπερεκτίμηση της θερμοκρασίας από το μοντέλο, ενώ αρνητικές τιμές αυτού υποδεικνύουν υποεκτίμηση της θερμοκρασίας από το μοντέλο. Στα Σχήματα 3.35 – 3.40 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προγνωστικών τιμών θερμοκρασίας για διάφορες φυσικές παραμετροποιήσεις και συγκεκριμένα των μέσων σφαλμάτων και των τυπικών αποκλίσεων των μέσων σφαλμάτων, των ζευγών τιμών πρόγνωσης – παρατήρησης θερμοκρασίας για τις 04 UTC και τις 12 UTC για την πρώτη (t+16h και t+24h αντίστοιχα) ημέρα πρόγνωσης για τις προεπιλεγμένες (Πίνακας 2.6) και για 6 διαφορετικές φυσικές παραμετροποιήσεις (Πίνακας 2.7) για τους WT1, WT2, WT5, WT7, WT9, WT10 και για κάθε μετεωρολογικό σταθμό.

Πίνακας 3.5. Μέσες απόλυτες τιμές των μέσων σφαλμάτων και σταθμισμένες τιμές των μέσων απόλυτων τιμών για την τελική επιλογή των φυσικών παραμετροποιήσεων που χρησιμοποιούνται στη μελέτη βελτίωσης αποτελεσμάτων.

A/A	Κωδικοποίηση παραμετροποίησης	Μέση απόλυτη τιμή WT9 (°C)	Μέση απόλυτη τιμή WT10 (°C)	Σταθμισμένη τιμή (°C)
1	pbl3 sfclay3	3.30	2.27	2.70
2	pbl99 sfclay91	3.90	2.62	3.15
3	pbl12 sfclay91	3.89	2.75	3.22
4	pbl7 sfclay91	3.93	2.75	3.24
5	pbl9 sfclay91	3.95	2.74	3.24
6	pbl1 sfclay91	4.02	2.73	3.26
7	Προεπιλεγμένη	6.06	4.81	5.33

Από την εξέταση των αποτελεσμάτων για τον WT1 (Σχήμα 3.35), για καθέναν από τους μετεωρολογικούς σταθμούς προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Αιτωλικό, καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC παρουσιάζονται για τη φυσική παραμετροποίηση pbl9 sfclay91, με την τιμή του ME να ισούται με $-0.3 \pm 1.3^{\circ}\text{C}$, ενώ για τη θερμοκρασία στις 12 UTC καλύτερες τιμές πρόγνωσης παρουσιάζονται για τη φυσική παραμετροποίηση pbl99 sfclay91 με τιμή ME $0.4 \pm 1.1^{\circ}\text{C}$. Γενικά δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφοροποιήσεις στις προγνώσεις θερμοκρασίας με εξαίρεση τη φυσική παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 που εμφανίζει τη μεγαλύτερη απόκλιση με υποεκτίμηση θερμοκρασίας στις 04 UTC με τιμή ME $-2.4 \pm 2.6^{\circ}\text{C}$.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Ασπράγγελοι, όλες οι φυσικές παραμετροποιήσεις που επιλέχθηκαν παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά στις προγνωστικές τιμές θερμοκρασίας στις 04 UTC και στις 12 UTC, δηλαδή μια γενικευμένη υποεκτίμηση τιμών θερμοκρασίας στις 04 UTC της τάξης των 2°C και μια καλή πρόγνωση τιμών θερμοκρασίας στις 12 UTC. Στην περίπτωση αυτή, οι

προεπιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις μπορούν να θεωρηθούν ως κατάλληλες για την πρόγνωση της θερμοκρασίας.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό της Φλώρινας, τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC παρατηρούνται για την παραμετροποίηση pbl9 sfclay91 με τιμή ME $0.2 \pm 1.7^\circ\text{C}$, με τις υπόλοιπες παραμετροποιήσεις να παρουσιάζουν καλύτερη πρόγνωση τιμών θερμοκρασίας στις 04 UTC σε σχέση με τις προεπιλεγμένες. Οι προγνώσεις στις 12 UTC υπερεκτιμούν ελαφρά τη θερμοκρασία, με την παραμετροποίηση pbl1 sfclay91 να εμφανίζει τιμή ME κοντά στο μηδέν, όμως σε όλες τις παραμετροποιήσεις παρατηρείται γενικά μεγάλη διασπορά τιμών. Αυτό σημαίνει σχετικά μεγάλη αβεβαιότητα στην πρόγνωση θερμοκρασίας στις 12 UTC, χωρίς όμως συστηματική υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση της.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Γαβαλού, τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC παρατηρούνται για τις παραμετροποιήσεις pbl12 sfclay91 και pbl99 sfclay91 με τιμή ME $-0.3 \pm 0.8^\circ\text{C}$, με τις υπόλοιπες παραμετροποιήσεις να παρουσιάζουν επίσης καλές τιμές πρόγνωσης θερμοκρασίας εκτός της παραμετροποίησης pbl3 sfclay3, όπου παρατηρείται υποεκτίμηση της θερμοκρασίας με τιμή ME $-2.4 \pm 2.1^\circ\text{C}$. Η θερμοκρασία στις 12 UTC προβλέπεται γενικά ικανοποιητικά από το μοντέλο για όλες τις παραμετροποιήσεις, με την παραμετροποίηση pbl1 sfclay91 να εμφανίζει τις καλύτερες τιμές με ME $0.3 \pm 1.1^\circ\text{C}$.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Γρεβενών, όλες οι επιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν μια παρόμοια εικόνα υπερεκτίμησης της θερμοκρασίας στις 04 UTC, με μια ελαφριά βελτίωση των τιμών σε σχέση με τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις, με την παραμετροποίηση pbl9 sfclay91 να εμφανίζει τα καλύτερα αποτελέσματα μεταξύ αυτών με τιμή ME $1.7 \pm 2.3^\circ\text{C}$. Στις 12 UTC παρατηρούνται γενικά μικρές τιμές ME σε όλες σχεδόν τις παραμετροποιήσεις, όμως υπάρχει μεγάλη διασπορά των τιμών θερμοκρασίας.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Ιωαννίνων, τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC και στις 12 UTC παρατηρούνται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμές ME $-0.4 \pm 2.2^\circ\text{C}$ και $0.4 \pm 1.5^\circ\text{C}$ αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες παραμετροποιήσεις εμφανίζουν παρόμοιες τιμές με μικρή υπερεκτίμηση που κυμαίνεται από 0.9°C έως 1.2°C στις 04 UTC και επίσης μικρή υπερεκτίμηση που κυμαίνεται από 0.8°C έως 1.0°C στις 12 UTC.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Καρπενήσι, όπου παρατηρείται και η μεγαλύτερη απόκλιση τιμών θερμοκρασίας στις 04 UTC από όλους τους σταθμούς, σημειώνεται ουσιαστική βελτίωση των αποτελεσμάτων πρόγνωσης θερμοκρασίας από το μοντέλο στις 04 UTC για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμή ME $0.2 \pm 2.1^\circ\text{C}$. Οι υπόλοιπες παραμετροποιήσεις στις 04 UTC εμφανίζουν παρόμοια εικόνα με υπερεκτίμηση της θερμοκρασίας της τάξης των 2.2°C . Η θερμοκρασία στις 12 UTC προβλέπεται πολύ καλά από το μοντέλο για όλες τις παραμετροποιήσεις.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Τρίκαλα, οι προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν τις καλύτερες τιμές θερμοκρασίας στις 04 UTC, ενώ όλες οι παραμετροποιήσεις που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζουν παρόμοια εικόνα υποεκτίμησης των τιμών πρόγνωσης θερμοκρασίας με τιμές που κυμαίνονται από 1.6°C έως 2.0°C . Οι τιμές θερμοκρασίας στις 12 UTC παρουσιάζουν μικρή υπερεκτίμηση για όλες τις παραμετροποιήσεις, με τη μεγαλύτερη απόκλιση να παρατηρείται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμή ME $1.7 \pm 2.1^\circ\text{C}$.

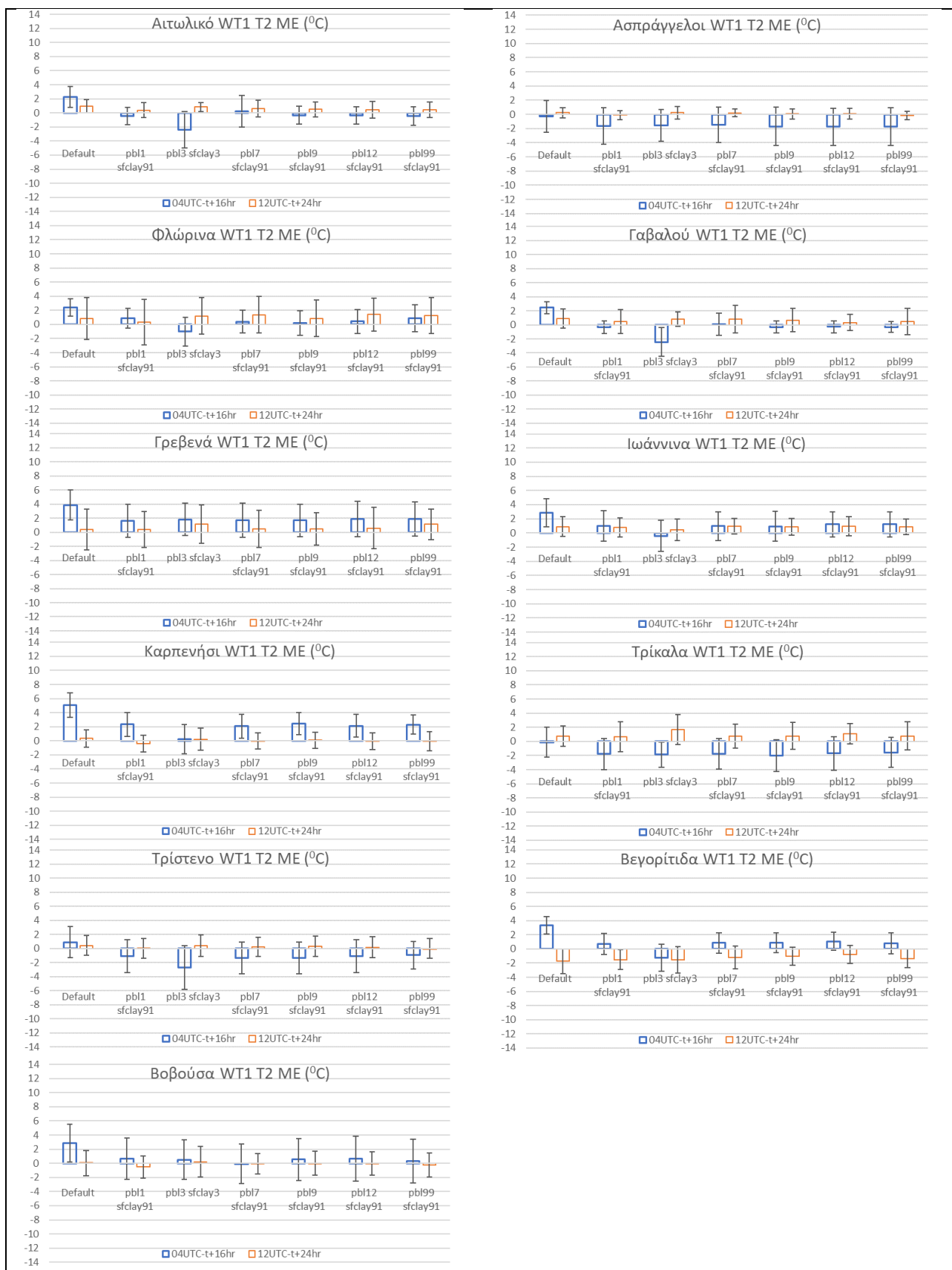
Για τον μετεωρολογικό σταθμό Τρίστενο, ο οποίος παρουσιάζει ήδη καλές τιμές πρόγνωσης θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις, δεν υπάρχει βελτίωση χρησιμοποιώντας τις επιλεγμένες παραμετροποιήσεις που παρουσιάζουν μια τάση υποεκτίμησης της

θερμοκρασίας στις 04 UTC, με τη μεγαλύτερη απόκλιση τιμών να παρατηρείται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμή ME $-2.7 \pm 3.1^{\circ}\text{C}$. Η θερμοκρασία στις 12 UTC προβλέπεται πολύ καλά από το μοντέλο για όλες τις παραμετροποιήσεις.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Βεγορίτιδα, τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC παρατηρούνται για την παραμετροποίηση pbl1 sfclay91 με τιμή ME $0.7 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$, με τις υπόλοιπες παραμετροποιήσεις να εμφανίζουν παρόμοια εικόνα μικρής υπερεκτίμησης θερμοκρασίας, εκτός της παραμετροποίησης pbl3 sfclay3 για την οποία παρατηρείται υποεκτίμηση θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία στις 12 UTC υποεκτιμάται γενικά από το μοντέλο για όλες τις παραμετροποιήσεις, με τις καλύτερες τιμές να παρατηρούνται για την παραμετροποίηση pbl12 sfclay91 με τιμή ME $-0.8 \pm 1.3^{\circ}\text{C}$.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Βοβούσα, όλες οι επιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν μια γενικευμένη εικόνα βελτίωσης της πρόγνωσης της θερμοκρασίας στις 04 UTC σε σχέση με τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις, όμως συνεχίζεται να παρατηρείται μεγάλη διασπορά των τιμών θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία στις 12 UTC προβλέπεται πολύ καλά από το μοντέλο για όλες τις παραμετροποιήσεις, με τις τιμές ME να προσεγγίζουν το μηδέν.

Για τον WT1, παρατηρείται ότι για τους μετεωρολογικούς σταθμούς, για τους οποίους το μοντέλο εμφάνισε καλά αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας με τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις (π.χ. Ασπράγγελοι, Τρίκαλα, Τρίστενο), παρουσιάζονται γενικά χειρότερα αποτελέσματα για τις άλλες παραμετροποιήσεις, ιδίως για τη θερμοκρασία στις 04 UTC. Επίσης, παρατηρείται ότι κάποιες παραμετροποιήσεις αποδίδουν καλύτερα σε συγκεκριμένους σταθμούς, για παράδειγμα η παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 αποδίδει καλά στους σταθμούς Καρπενήσι και Ιωάννινα.



Σχήμα 3.35. Γραφική απεικόνιση των μέσων σφαλμάτων (ME) και τυπικών αποκλίσεων των ME των ζευγών τιμών πρόγνωσης – παρατήρησης θερμοκρασίας στα 2 μέτρα (T2) σε °C στις 04 UTC και 12 UTC για την πρώτη (t+16h και t+24h αντίστοιχα) ημέρα πρόγνωσης, για την προεπιλεγμένη (Default) και για 6 διαφορετικές φυσικές παραμετροποιήσεις για κάθε μετεωρολογικό σταθμό και για τον WT1.

Από την εξέταση των αποτελεσμάτων για τον WT2 (Σχήμα 3.36) προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για καθένα από τους μετεωρολογικούς σταθμούς:

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Αιτωλικό, τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC εμφανίζονται για την παραμετροποίηση pbl1 sfclay91 με τιμή ME $0.0 \pm 1.1^\circ\text{C}$, με τις υπόλοιπες παραμετροποιήσεις να ακολουθούν τις καλές προγνώσεις θερμοκρασίας στις 04 UTC εκτός της παραμετροποίησης pbl3 sfclay3 που εμφανίζει τις μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ των παραμετροποιήσεων με υποεκτίμηση θερμοκρασίας στις 04 UTC (τιμή ME $-2.3 \pm 1.6^\circ\text{C}$) και υπερεκτίμηση θερμοκρασίας στις 12 UTC (τιμή ME $2.0 \pm 1.2^\circ\text{C}$). Οι υπόλοιπες φυσικές παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν πολύ καλές τιμές πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 12 UTC, με την καλύτερη πρόγνωση να εμφανίζεται για την παραμετροποίηση pbl9 sfclay91.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Ασπράγγελοι, καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC και στις 12 UTC παρουσιάζονται για τη φυσική παραμετροποίηση pbl3 sfclay3, με τις τιμές του ME να ισούνται με $-0.3 \pm 1.7^\circ\text{C}$ και $-0.7 \pm 0.7^\circ\text{C}$ αντίστοιχα. Όλες οι υπόλοιπες παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν παρόμοια εικόνα προγνωστικών τιμών θερμοκρασίας με μια υπερεκτίμηση περίπου 1.8°C στις 04 UTC και μια υποεκτίμηση θερμοκρασιών περίπου 1.5°C στις 12 UTC.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό της Φλώρινας, παρατηρείται ουσιαστική βελτίωση των προγνωστικών τιμών θερμοκρασίας στις 04 UTC για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμή ME $0.7 \pm 1.2^\circ\text{C}$, με όλες τις υπόλοιπες παραμετροποιήσεις να εμφανίζουν γενικευμένη εικόνα υπερεκτίμησης της θερμοκρασίας της τάξης των 2.7°C . Η θερμοκρασία στις 12 UTC εν γένει προβλέπεται ικανοποιητικά από το μοντέλο για όλες τις παραμετροποιήσεις με μια μικρή τάση υποεκτίμησης, με τη μεγαλύτερη απόκλιση να παρατηρείται στην παραμετροποίηση pbl9 sfclay91 με τιμή ME $-0.9 \pm 0.3^\circ\text{C}$.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Γαβαλού, τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC παρατηρούνται για όλες τις επιλεγμένες παραμετροποιήσεις με τιμή ME $1.0 \pm 0.9^\circ\text{C}$, εκτός της παραμετροποίησης pbl3 sfclay3, όπου παρατηρείται υποεκτίμηση τιμών θερμοκρασίας με τιμή ME $-1.8 \pm 1.7^\circ\text{C}$. Η παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 εμφανίζει τις καλύτερες προγνώσεις θερμοκρασίας στις 12 UTC με τιμή ME $-0.1 \pm 0.5^\circ\text{C}$, ενώ και στις υπόλοιπες παραμετροποιήσεις δεν παρατηρείται μεγάλη απόκλιση τιμών από τις πραγματικές στις 12 UTC.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Γρεβενών, όλες οι επιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν μια παρόμοια εικόνα υπερεκτίμησης των τιμών πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC, με μια μικρή βελτίωση των τιμών σε σχέση με τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις και την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 να εμφανίζει τα καλύτερα αποτελέσματα μεταξύ αυτών με τιμή ME $3.9 \pm 1.3^\circ\text{C}$. Επίσης στις 12 UTC παρατηρείται παρόμοια εικόνα μικρής υποεκτίμησης της θερμοκρασίας από το μοντέλο σε όλες τις παραμετροποιήσεις, με τις καλύτερες τιμές να παρατηρούνται στην παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμή ME $-1.0 \pm 0.7^\circ\text{C}$. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται μια γενικευμένη δυσκολία πρόγνωσης της θερμοκρασίας στις 04 UTC από όλες τις φυσικές παραμετροποιήσεις.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Ιωαννίνων, παρατηρείται αξιοσημείωτη βελτίωση της πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμή ME $3.5 \pm 0.4^\circ\text{C}$, ενώ οι υπόλοιπες παραμετροποιήσεις εμφανίζουν ίδια υπερεκτίμηση τιμών θερμοκρασίας ίση με 5.1°C . Σε αυτή την περίπτωση, χαρακτηριστική είναι η πολύ μικρή διασπορά των τιμών θερμοκρασίας στις 04 UTC που σημαίνει συστηματική υπερεκτίμηση τιμών από το μοντέλο. Οι τιμές

θερμοκρασίας στις 12 UTC υποεκτιμούνται γενικά από το μοντέλο για όλες τις παραμετροποιήσεις, με τις τιμές του ME να κυμαίνονται από -0.6°C έως -1.0°C .

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Καρπενήσι, παρατηρείται μεγάλη βελτίωση της πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC (περίπου 7°C), όπως και προηγουμένως στον σταθμό Ιωαννίνων, για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμή ME $4.1\pm 1.8^{\circ}\text{C}$, αν και εξακολουθεί να υπάρχει αξιοσημείωτη υπερεκτίμηση της θερμοκρασίας από το μοντέλο. Οι υπόλοιπες παραμετροποιήσεις εμφανίζουν περίπου ίδιες τιμές υπερεκτίμησης των θερμοκρασιών στις 04 UTC της τάξης των 7.6°C . Η παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 εμφανίζει τις καλύτερες τιμές πρόγνωσης θερμοκρασίας και στις 12 UTC με τιμή ME $0.3\pm 1.2^{\circ}\text{C}$, ενώ και στις υπόλοιπες παραμετροποιήσεις δεν παρατηρείται μεγάλη απόκλιση τιμών από τις πραγματικές.

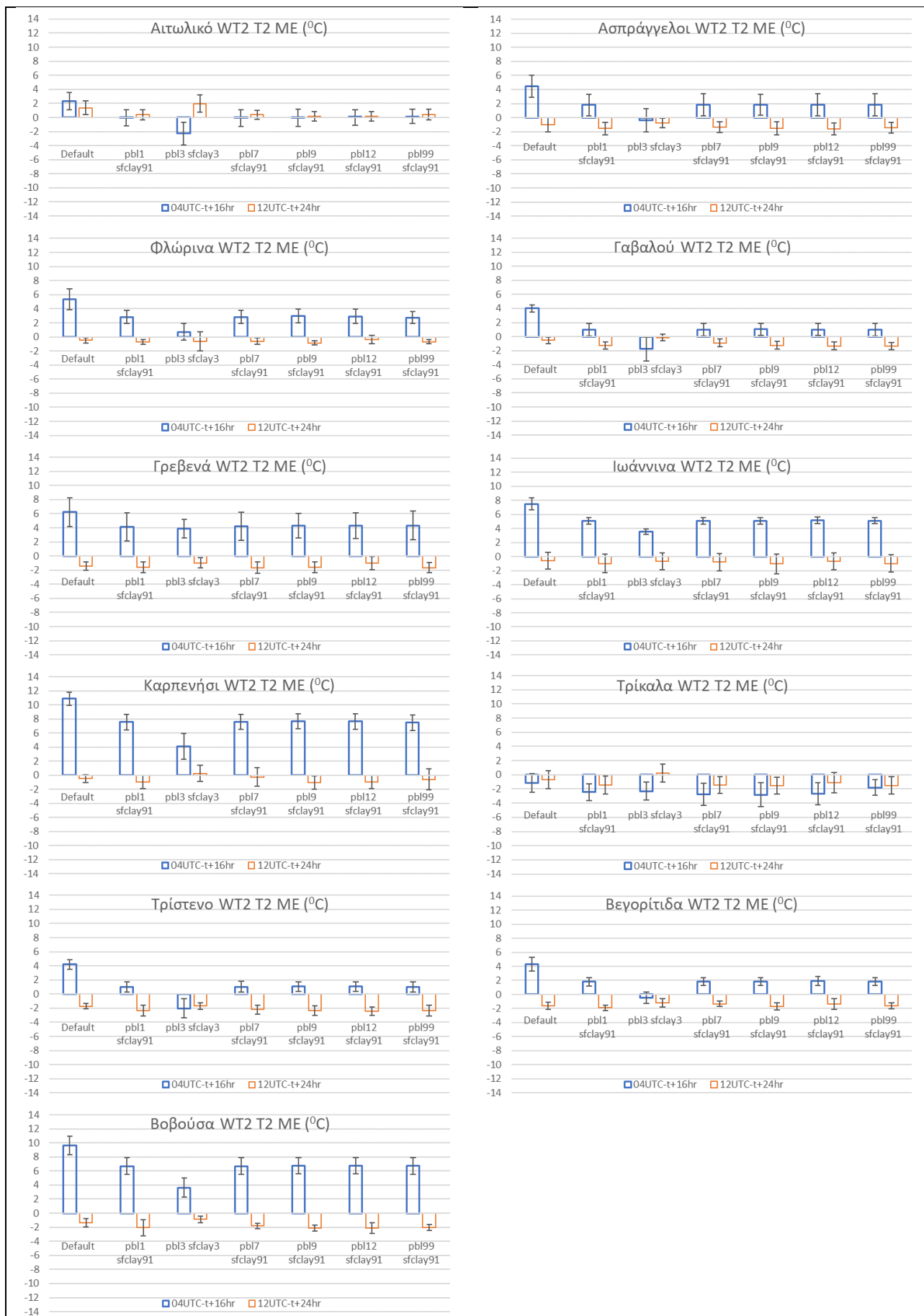
Για τον μετεωρολογικό σταθμό Τρίκαλα, όπως παρατηρήθηκε και στον WT1, οι προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν τις καλύτερες προγνώσεις θερμοκρασίας στις 04 UTC, ενώ όλες οι παραμετροποιήσεις που χρησιμοποιήθηκαν εμφανίζουν ίδια εικόνα υποεκτίμησης της θερμοκρασίας με τις τιμές ME να κυμαίνονται από -1.8°C έως -2.8°C . Οι προγνώσεις θερμοκρασίας στις 12 UTC παρουσιάζουν τάση υποεκτίμησης για όλες τις παραμετροποιήσεις, εκτός της παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 όπου παρατηρούνται τα καλύτερα αποτελέσματα με τιμή ME $0.3\pm 1.3^{\circ}\text{C}$.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Τρίστενο, παρατηρούνται γενικά μικρές αποκλίσεις των τιμών πρόγνωσης θερμοκρασίας και μικρή τάση υπερεκτίμησης (της τάξης του 1°C) στις 04 UTC για τις περισσότερες παραμετροποιήσεις με εξαίρεση την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 που εμφανίζει υποεκτίμηση θερμοκρασίας της τάξης των 2°C . Όλες οι παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν υποεκτίμηση στην θερμοκρασία στις 12 UTC που κυμαίνεται από 1.7°C έως 2.4°C .

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Βεγορίτιδα, αξιοσημείωτη βελτίωση της πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC παρατηρείται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3, για την οποία εμφανίζονται και τα καλύτερα αποτελέσματα στις 12 UTC, με τιμές ME $-0.5\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ και $-1.2\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα. Για τις υπόλοιπες παραμετροποιήσεις, το μοντέλο υπερεκτιμά τη θερμοκρασία στις 04 UTC κατά περίπου 1.8°C ενώ υποεκτιμά τη θερμοκρασία στις 12 UTC από 1.4°C έως 1.9°C .

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Βοβούσα οι καλύτερες προγνώσεις θερμοκρασίας τόσο στις 04 UTC όσο και στις 12 UTC εμφανίζονται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3, όπως παρατηρείται και στον WT1, με τιμές ME $3.6\pm 1.4^{\circ}\text{C}$ και $-0.9\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν μεγάλη αδυναμία πρόγνωσης της θερμοκρασίας στις 04 UTC, εμφανίζοντας υπερεκτίμηση κατά 6.7°C , ενώ στις 12 UTC εμφανίζουν υποεκτίμηση περίπου 2.0°C .

Για τον WT2 παρατηρείται ότι η παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 εμφάνισε καλά αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασιών για τους μετεωρολογικούς σταθμούς Ασπράγγελοι, Φλώρινα, Γρεβενά, Ιωάννινα, Καρπενήσι, Βεγορίτιδα και Βοβούσα όμως ταυτόχρονα παρατηρήθηκαν αρκετές αποκλίσεις σε άλλους σταθμούς όπως το Αιτωλικό και το Τρίστενο.



Σχήμα 3.36. Όπως στο Σχήμα 3.35, αλλά για τον WT2.

Από την εξέταση των αποτελεσμάτων για τον WT5 (Σχήμα 3.37) προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για καθένα από τους μετεωρολογικούς σταθμούς:

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Αιτωλικό, η φυσική παραμετροποίηση pbl1 sfclay91 παρουσιάζει την καλύτερη πρόγνωση θερμοκρασίας στις 04 UTC με τιμή ME $0.7 \pm 0.9^{\circ}\text{C}$, με όλες τις υπόλοιπες φυσικές παραμετροποιήσεις να παρουσιάζουν γενικά μια καλή εικόνα προγνώσεων στις 04 UTC που υπερέχει αυτής με τις προεπιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις. Η φυσική παραμετροποίηση pbl12 sfclay91 παρουσιάζει τις καλύτερες τιμές πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 12 UTC με τιμή ME $0.0 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$, με τις υπόλοιπες παραμετροποιήσεις να ακολουθούν τις καλές προγνώσεις θερμοκρασίας, εκτός της παραμετροποίησης pbl3 sfclay3 που εμφανίζει υπερεκτίμηση θερμοκρασίας στις 12 UTC με τιμή ME $2.2 \pm 1.8^{\circ}\text{C}$.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Ασπράγγελοι, τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC και στις 12 UTC εμφανίζονται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμές ME $0.2 \pm 1.6^{\circ}\text{C}$ και $-1.7 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες παραμετροποιήσεις εμφανίζουν μια παρόμοια εικόνα προγνωστικών τιμών θερμοκρασίας, με μια υπερεκτίμηση περίπου 1°C στις 04 UTC και μια υποεκτίμηση περίπου 2.5°C στις 12 UTC.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό της Φλώρινας, παρατηρείται μια γενικευμένη εικόνα υπερεκτίμησης της θερμοκρασίας στις 04 UTC για όλες τις παραμετροποιήσεις, με τις καλύτερες τιμές ME να παρατηρούνται στην παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 (τιμή $2.1 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$) και μια γενική δυσκολία του μοντέλου να προβλέψει ορθά τις τιμές θερμοκρασίας. Οι θερμοκρασίες στις 12 UTC γενικά προβλέπονται σωστά με τις περισσότερες παραμετροποιήσεις του μοντέλου αν και υπάρχει μια τάση υποεκτίμησής τους, με τα καλύτερα αποτελέσματα να παρατηρούνται στην παραμετροποίηση pbl7 sfclay91 με τιμή ME $-0.4 \pm 1.2^{\circ}\text{C}$.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Γαβαλού, τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC και στις 12 UTC παρουσιάζονται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμές ME $0.6 \pm 0.6^{\circ}\text{C}$ και $0.3 \pm 0.9^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες παραμετροποιήσεις εμφανίζουν μια παρόμοια εικόνα προγνωστικών τιμών θερμοκρασίας, με μια υπερεκτίμηση περίπου 2°C στις 04 UTC και μια υποεκτίμηση περίπου 1.6°C στις 12 UTC.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Γρεβενών, όλες οι επιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν παρόμοια εικόνα υπερεκτίμησης της θερμοκρασίας στις 04 UTC, με μια μικρή βελτίωση σε σχέση με τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις και με την παραμετροποίηση pbl1 sfclay91 να εμφανίζει τα καλύτερα αποτελέσματα μεταξύ αυτών με τιμή ME $3.0 \pm 1.2^{\circ}\text{C}$. Τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 12 UTC παρατηρούνται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμή ME $-0.5 \pm 1.2^{\circ}\text{C}$, ενώ οι υπόλοιπες παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν ίδια εικόνα υποεκτίμησης της θερμοκρασίας που κυμαίνεται από 0.9°C έως 1.4°C . Γενικά παρατηρείται μια δυσκολία πρόγνωσης της θερμοκρασίας από το μοντέλο στις 04 UTC για όλες τις φυσικές παραμετροποιήσεις.

Στον μετεωρολογικό σταθμό Ιωαννίνων, η μεγαλύτερη βελτίωση των τιμών πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC παρατηρείται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμή ME $4.0 \pm 0.9^{\circ}\text{C}$, ενώ οι υπόλοιπες παραμετροποιήσεις εμφανίζουν σχεδόν ίδια υπερεκτίμηση τιμών θερμοκρασίας περί τους 5°C . Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται σχετικά μικρή διασπορά των τιμών θερμοκρασίας στις 04 UTC που ερμηνεύεται ως συστηματική υπερεκτίμηση θερμοκρασίας από το μοντέλο. Οι τιμές θερμοκρασίας στις 12 UTC υποεκτιμούνται ελαφρώς από το μοντέλο για

όλες τις παραμετροποιήσεις, με την καλύτερη τιμή να παρουσιάζεται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με ME $-0.3 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Καρπενησίου, όπου εμφανίζονται τα μεγαλύτερα σφάλματα ανάμεσα σε όλους τους σταθμούς, παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC σε όλες τις παραμετροποιήσεις με τις καλύτερες προγνώσεις θερμοκρασίας στις 04 UTC όσο και στις 12 UTC να εμφανίζονται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3, με αντίστοιχες τιμές ME $5.4 \pm 1.8^{\circ}\text{C}$ και $-0.1 \pm 1.4^{\circ}\text{C}$. Σε όλες τις άλλες παραμετροποιήσεις, για τη θερμοκρασία στις 12 UTC εμφανίζεται εικόνα μικρής υποεκτίμησης, ενώ για τις 04 UTC σημειώνονται τιμές ME άνω των 7.3°C , αναδεικνύοντας τη δυσκολία του μοντέλου για ακριβή πρόγνωση.

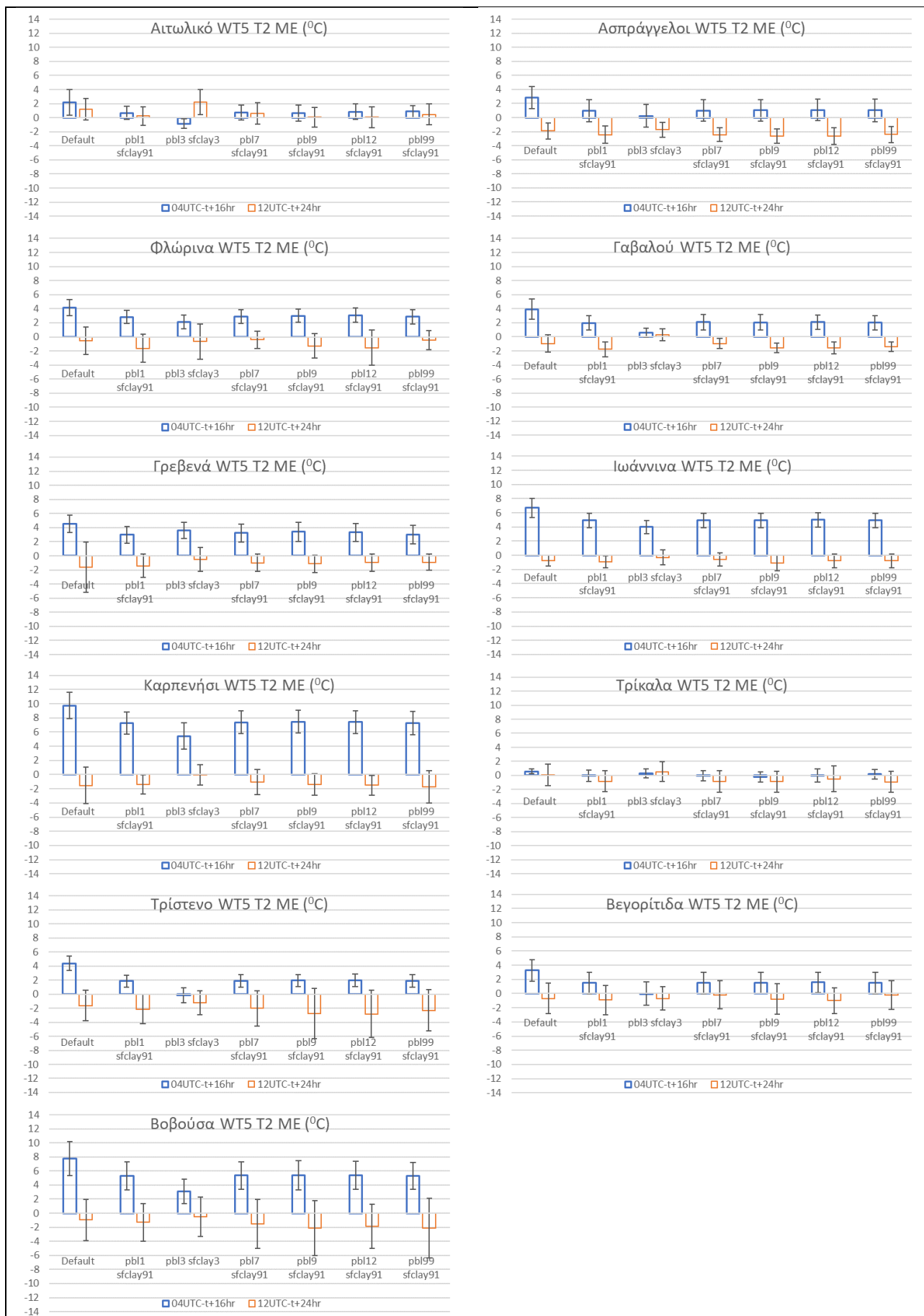
Για τον μετεωρολογικό σταθμό Τρικάλων, παρατηρείται μια γενικευμένη εικόνα ορθής πρόγνωσης της θερμοκρασίας τόσο για τις 04 UTC όσο και για τις 12 UTC. Σε όλες τις παραμετροποιήσεις, για τις προγνώσεις θερμοκρασίας στις 04 UTC παρατηρείται μικρή διασπορά των τιμών με το ME να προσεγγίζει το μηδέν, ενώ στις 12 UTC παρατηρείται λίγο μεγαλύτερη διασπορά των τιμών αν και η πρόγνωση είναι γενικά ικανοποιητική.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Τρίστενο, τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC και στις 12 UTC εμφανίζονται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμές ME $-0.2 \pm 1.1^{\circ}\text{C}$ και $-1.2 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες παραμετροποιήσεις εμφανίζουν παρόμοια εικόνα πρόγνωσης θερμοκρασίας, με υπερεκτίμηση των τιμών κατά περίπου 2°C στις 04 UTC, ενώ στις 12 UTC παρατηρείται μεγάλη διακύμανση των τιμών σε συγκεκριμένες παραμετροποιήσεις με υποεκτίμηση θερμοκρασιών που κυμαίνεται από 2.0°C έως 2.8°C .

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Βεγορίτιδας, τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC εμφανίζονται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμή ME $0.0 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$, ενώ οι υπόλοιπες παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν μικρή υπερεκτίμηση της θερμοκρασίας γύρω στους 1.5°C . Στις 12 UTC οι παραμετροποιήσεις pbl7 sfclay91 και pbl99 sfclay91 εμφανίζουν τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας με τιμή ME $-0.2 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$.

Στον μετεωρολογικό σταθμό Βοβούσας, παρατηρείται γενικευμένη μεγάλη υπερεκτίμηση της θερμοκρασίας στις 04 UTC και ταυτόχρονα μικρότερη υποεκτίμηση της θερμοκρασίας στις 12 UTC για όλες σχεδόν τις παραμετροποιήσεις. Επίσης παρατηρείται σε όλες σχεδόν τις παραμετροποιήσεις μεγάλη διασπορά των τιμών θερμοκρασίας, ιδιαίτερα στις 12 UTC. Τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC και στις 12 UTC εμφανίζονται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμές ME $3.1 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ και $-0.5 \pm 2.8^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα.

Για τον WT5 παρατηρείται ότι η παραμετροποίηση pbl3 sfclay3, όπως και στον WT2, εμφάνισε γενικά καλά αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασιών για αρκετούς μετεωρολογικούς σταθμούς, με βελτίωση των αρχικών τιμών που παρατηρούνται με τη χρήση των προεπιλεγμένων φυσικών παραμετροποιήσεων.



Σχήμα 3.37. Όπως στο Σχήμα 3.35, αλλά για τον WT5.

Από την εξέταση των αποτελεσμάτων για τον WT7 (Σχήμα 3.38), προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για καθένα από τους μετεωρολογικούς σταθμούς:

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Αιτωλικό, τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC εμφανίζονται για την παραμετροποίηση pbl1 sfclay91 με τιμή ME $0.2 \pm 0.9^{\circ}\text{C}$, με τις υπόλοιπες παραμετροποιήσεις να ακολουθούν τις καλές προγνώσεις θερμοκρασίας στις 04 UTC, εκτός της παραμετροποίησης pbl3 sfclay3 που εμφανίζει μικρή υποεκτίμηση θερμοκρασίας στις 04 UTC με τιμή ME $-1.2 \pm 0.9^{\circ}\text{C}$ και υπereκτίμηση θερμοκρασίας στις 12 UTC με τιμή ME $2.4 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$. Οι υπόλοιπες παραμετροποιήσεις στις 12 UTC εμφανίζουν καλύτερες τιμές από αυτές των προεπιλεγμένων φυσικών παραμετροποιήσεων με ελαφριά υπereκτίμηση θερμοκρασιών, με τις καλύτερες τιμές πρόγνωσης να εμφανίζονται στην παραμετροποίηση pbl12 sfclay91 με τιμή ME $0.9 \pm 1.3^{\circ}\text{C}$.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Ασπράγγελοι, τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC εμφανίζονται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμή ME $0.6 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$, με τις υπόλοιπες παραμετροποιήσεις να εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά στην πρόγνωση θερμοκρασίας. Γενικά όλες οι παραμετροποιήσεις στις 12 UTC παρουσιάζουν καλή πρόγνωση θερμοκρασίας με τυπική απόκλιση τιμών περίπου 1.8°C , με τη μεγαλύτερη απόκλιση πρόγνωσης – παρατήρησης να εμφανίζεται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμή ME $0.7 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό της Φλώρινας, τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC και ταυτόχρονα τα χειρότερα στις 12 UTC παρατηρούνται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμές ME $0.4 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$ και ME $2.0 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα. Τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 12 UTC παρατηρούνται για την παραμετροποίηση pbl99 sfclay91 με τιμή ME $-0.1 \pm 1.6^{\circ}\text{C}$. Σε αυτή την περίπτωση, τα αποτελέσματα πρόγνωσης όλων των παραμετροποιήσεων γενικά δεν παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Γαβαλού, τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC και στις 12 UTC παρουσιάζονται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμές ME $-0.3 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ και $0.1 \pm 2.5^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα, όμως σε αυτή την παραμετροποίηση παρατηρείται μεγάλη διασπορά τιμών στις 12 UTC. Οι υπόλοιπες παραμετροποιήσεις εμφανίζουν ίδια εικόνα προγνωστικών τιμών θερμοκρασίας στις 04 UTC, με μια υπereκτίμηση περίπου 0.9°C , ενώ στις 12 UTC παρουσιάζουν μια υποεκτίμηση θερμοκρασιών που κυμαίνεται από 0.5°C μέχρι 1.4°C .

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Γρεβενών, όλες οι επιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν παρόμοια εικόνα μικρής υπereκτίμησης της θερμοκρασίας στις 04 UTC με αυτή των προεπιλεγμένων παραμετροποιήσεων. Παρατηρείται μια μικρή βελτίωση σε σχέση με τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις με την παραμετροποίηση pbl9 sfclay91 να εμφανίζει τα καλύτερα αποτελέσματα με τιμή ME $1.3 \pm 1.3^{\circ}\text{C}$. Όσον αφορά τις τιμές πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 12 UTC, παρατηρείται γενικά μια καλή πρόγνωση από το μοντέλο για όλες τις παραμετροποιήσεις με τις τιμές ME να κυμαίνονται αρκετά κοντά στο μηδέν.

Στον μετεωρολογικό σταθμό Ιωαννίνων, σε όλες τις επιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις παρατηρείται υπereκτίμηση της θερμοκρασίας στις 04 UTC, με την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 να εμφανίζει ελαφρώς καλύτερες τιμές από τις άλλες με τιμή ME $2.3 \pm 1.8^{\circ}\text{C}$. Γενικά όλες οι παραμετροποιήσεις στις 12 UTC παρουσιάζουν καλή πρόγνωση θερμοκρασίας αν και με μεγάλη διασπορά των τιμών.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Καρπενησίου, όπου εμφανίζονται τα μεγαλύτερα σφάλματα ανάμεσα σε όλους τους σταθμούς, παρατηρούνται μεγάλες υπερεκτιμήσεις θερμοκρασίας από το μοντέλο στις 04 UTC σε όλες τις παραμετροποιήσεις με τις καλύτερες τιμές θερμοκρασίας να εμφανίζονται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3, με τιμή ME $3.8 \pm 2.0^\circ\text{C}$. Σε όλες τις άλλες παραμετροποιήσεις για τη θερμοκρασία στις 04 UTC, η υπερεκτίμηση τιμών ισούται με περίπου 5.5°C . Στις 12 UTC η θερμοκρασία προβλέπεται γενικά ικανοποιητικά από το μοντέλο σχεδόν για όλες τις παραμετροποιήσεις αν και παρατηρείται αρκετή διασπορά των τιμών.

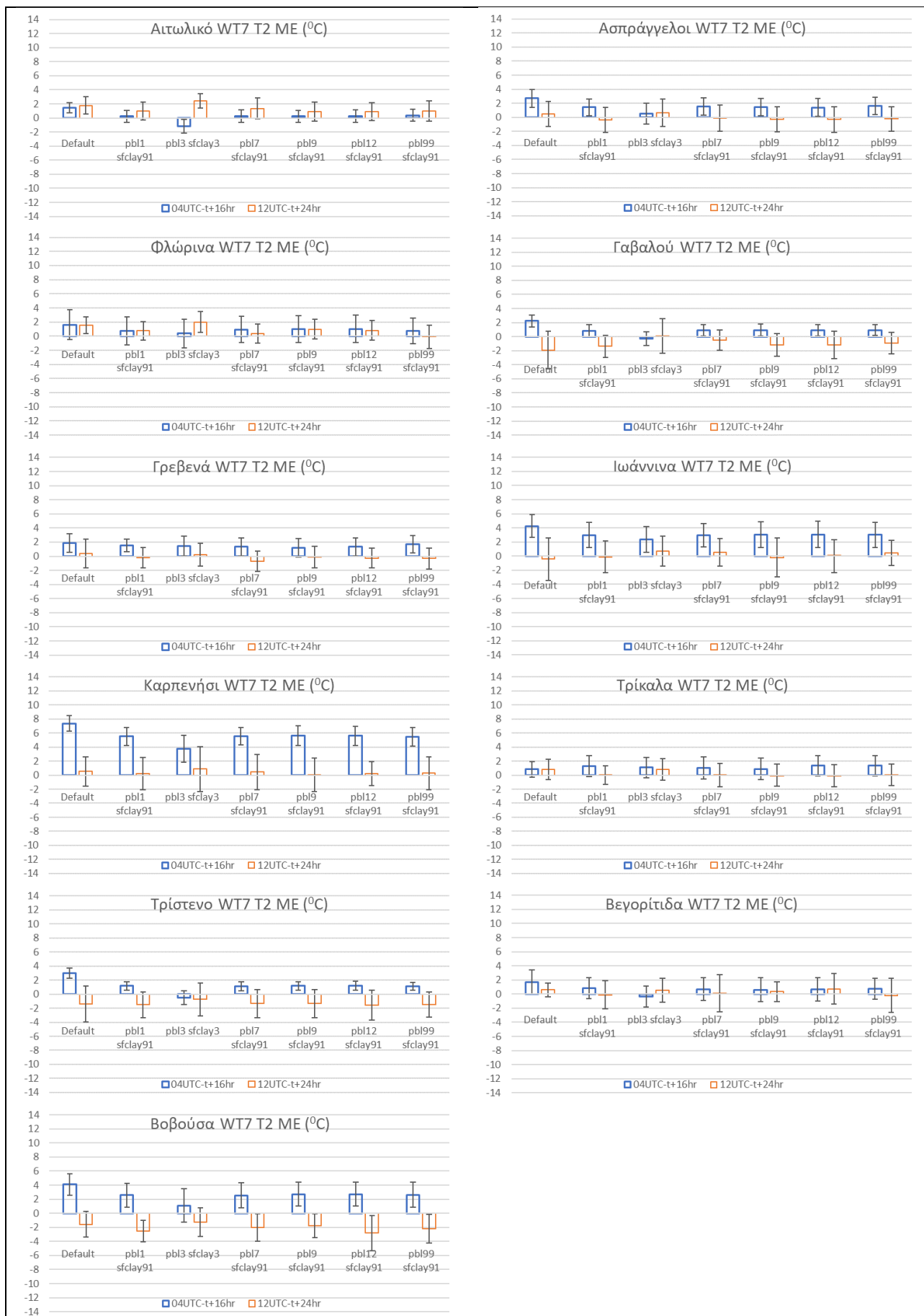
Για τον μετεωρολογικό σταθμό Τρικάλων, παρατηρείται γενικά μια καλή εικόνα πρόγνωσης θερμοκρασίας, τόσο για τις 04 UTC όσο και για τις 12 UTC. Οι επιλεγμένες παραμετροποιήσεις, οι οποίες παρουσιάζουν τάση υπερεκτίμησης στις 04 UTC που κυμαίνεται από 0.9°C έως 1.3°C , δε φαίνεται να συμβάλουν ουσιαστικά στη βελτίωση της πρόγνωσης στις 04 UTC, ενώ στις 12 UTC αρκετές από τις παραμετροποιήσεις εμφανίζουν τιμές ME που προσεγγίζουν το μηδέν.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Τρίστενο, τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC και στις 12 UTC, παρουσιάζονται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμές ME $-0.5 \pm 0.9^\circ\text{C}$ και $-0.8 \pm 2.3^\circ\text{C}$ αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες παραμετροποιήσεις εμφανίζουν τάση υπερεκτίμησης της θερμοκρασίας στις 04 UTC περίπου ίση με 1.2°C , ενώ εμφανίζουν υποεκτίμηση της θερμοκρασίας στις 12 UTC που κυμαίνεται από 1.3°C έως 1.6°C .

Για τον μετεωρολογικό σταθμό της Βεγορίτιδας, παρατηρούνται γενικά καλές προγνώσεις θερμοκρασίας για όλες τις επιλεγμένες παραμετροποιήσεις, με τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης στις 04 UTC να εμφανίζονται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμή ME $-0.4 \pm 1.5^\circ\text{C}$. Στις 12 UTC επίσης παρατηρούνται καλές τιμές θερμοκρασίας για όλες τις παραμετροποιήσεις με τιμές ME που προσεγγίζουν το μηδέν, αν και με υψηλότερη διασπορά τιμών από αυτές που παρατηρούνται στις 04 UTC.

Στον μετεωρολογικό σταθμό Βοβούσας, παρατηρείται γενικευμένη υπερεκτίμηση της θερμοκρασίας στις 04 UTC και ταυτόχρονα υποεκτίμηση της θερμοκρασίας στις 12 UTC για όλες τις παραμετροποιήσεις. Τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC και στις 12 UTC με τιμές ME $1.1 \pm 2.4^\circ\text{C}$ και $-1.3 \pm 2.0^\circ\text{C}$ αντίστοιχα, εμφανίζονται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3, η οποία βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό τις αποκλίσεις τιμών θερμοκρασίας που παρατηρούνται στις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις.

Για τον WT7 παρατηρείται ότι η παραμετροποίηση pbl3 sfclay3, όπως και σε προηγούμενους WTs, αναδεικνύεται ως η πιο επιτυχημένη στις περισσότερες περιπτώσεις.



Σχήμα 3.38. Όπως στο Σχήμα 3.35, αλλά για τον WT7.

Από την εξέταση των αποτελεσμάτων για τον WT9 (Σχήμα 3.39) προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για καθένα από τους μετεωρολογικούς σταθμούς:

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Αιτωλικό, καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC και στις 12 UTC παρουσιάζονται για τη φυσική παραμετροποίηση pbl99 sfclay91, με τις τιμές του ME να ισούνται με $1.0 \pm 2.5^{\circ}\text{C}$ και $0.5 \pm 1.3^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα. Γενικά όλες οι επιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις εμφανίζουν καλύτερες προγνωστικές τιμές θερμοκρασίας στις 04 UTC, σε σχέση με τις προεπιλεγμένες, με ελαφριά υπερεκτίμηση, εκτός της παραμετροποίησης pbl3 sfclay3 που παρουσιάζει υποεκτίμηση της θερμοκρασίας.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Ασπράγγελοι, όλες οι επιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν μεγάλη βελτίωση στις τιμές του ME για τις προγνωστικές θερμοκρασίες στις 04 UTC, όμως η εικόνα της υψηλής διασποράς των τιμών που εμφανίζουν οι προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις επαναλαμβάνεται και στις παραμετροποιήσεις δοκιμών βελτίωσης. Όσον αφορά τις προγνωστικές τιμές θερμοκρασίες στις 12 UTC εμφανίζουν μια γενικευμένη υποεκτίμηση τιμών, με τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις και την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 να εμφανίζουν τις καλύτερες τιμές, και τις υπόλοιπες παραμετροποιήσεις να ακολουθούν.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό της Φλώρινας, τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC παρατηρούνται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμή ME $1.3 \pm 2.6^{\circ}\text{C}$ και στις 12 UTC παρατηρούνται για την παραμετροποίηση pbl1 sfclay91 με τιμή ME $0.9 \pm 1.2^{\circ}\text{C}$. Γενικά, παρατηρείται μια εικόνα υπερεκτίμησης της θερμοκρασίας από το μοντέλο τόσο στις 04 UTC όσο και στις 12 UTC για όλες τις παραμετροποιήσεις που χρησιμοποιούνται, με ταυτόχρονη ύπαρξη διασποράς των τιμών ιδίως στις 04 UTC.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Γαβαλού, τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC παρατηρούνται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμή ME $0.9 \pm 2.3^{\circ}\text{C}$. Στις 12 UTC παρατηρείται πολύ καλή πρόγνωση από το μοντέλο για όλες τις παραμετροποιήσεις, με τη μεγαλύτερη απόκλιση να παρατηρείται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμή ME $0.9 \pm 0.7^{\circ}\text{C}$.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Γρεβενών, όλες οι επιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν παρόμοια εικόνα υπερεκτίμησης της θερμοκρασίας στις 04 UTC, με μια μικρή βελτίωση σε σχέση με τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις κατά περίπου 2°C στις τιμές ME, και την παραμετροποίηση pbl1 sfclay91 να εμφανίζει τα καλύτερα αποτελέσματα με τιμή ME $4.2 \pm 2.1^{\circ}\text{C}$. Για τις τιμές πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 12 UTC, παρατηρείται γενικά μια καλή πρόγνωση από το μοντέλο για όλες τις παραμετροποιήσεις με τις τιμές ME να κυμαίνονται αρκετά κοντά στο μηδέν. Παρατηρείται γενικευμένη δυσκολία πρόγνωσης της θερμοκρασίας στις 04 UTC για όλες τις φυσικές παραμετροποιήσεις με μεγάλες αποκλίσεις από τις παρατηρήσεις.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό των Ιωαννίνων, ο οποίος παρουσιάζει και τις μεγαλύτερες τιμές ME από όλους τους σταθμούς, όλες οι επιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις εμφανίζουν πολύ μεγάλες τιμές υπερεκτίμησης των θερμοκρασιών στις 04 UTC, ενώ παρατηρείται ότι καμία από τις παραμετροποιήσεις που δοκιμάστηκαν δε βελτιώνει ουσιαστικά τις θερμοκρασίες στις 04 UTC. Οι καλύτερες προγνώσεις εμφανίζονται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμή ME $6.0 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$, αλλά και στην περίπτωση αυτή οι προγνώσεις απέχουν πολύ από τις παρατηρήσεις. Για την πρόγνωση θερμοκρασίας στις 12 UTC, παρατηρείται γενικά υπερεκτίμηση από το μοντέλο για όλες τις παραμετροποιήσεις, με τις τιμές ME να κυμαίνονται από 0.9°C έως 1.5°C .

Στον μετεωρολογικό σταθμό Καρπενήσι, εμφανίζεται η μεγαλύτερη διασπορά των τιμών πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC μεταξύ όλων των σταθμών, γεγονός που δείχνει τη δυσκολία πρόγνωσης της θερμοκρασίας από το μοντέλο στις 04 UTC, όπου εμφανίζεται και μια γενικευμένη εικόνα υπερεκτίμησης των τιμών για όλες τις παραμετροποιήσεις. Τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC με τιμή ME $2.6 \pm 4.0^\circ\text{C}$ παρατηρούνται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3, η οποία φαίνεται ότι συμβάλει ουσιαστικά στη βελτίωση της πρόγνωσης από το μοντέλο. Για τη θερμοκρασία στις 12 UTC, παρατηρείται γενικά μια καλή πρόγνωση από το μοντέλο για όλες τις παραμετροποιήσεις με τιμές ME που κυμαίνονται αρκετά κοντά στο μηδέν.

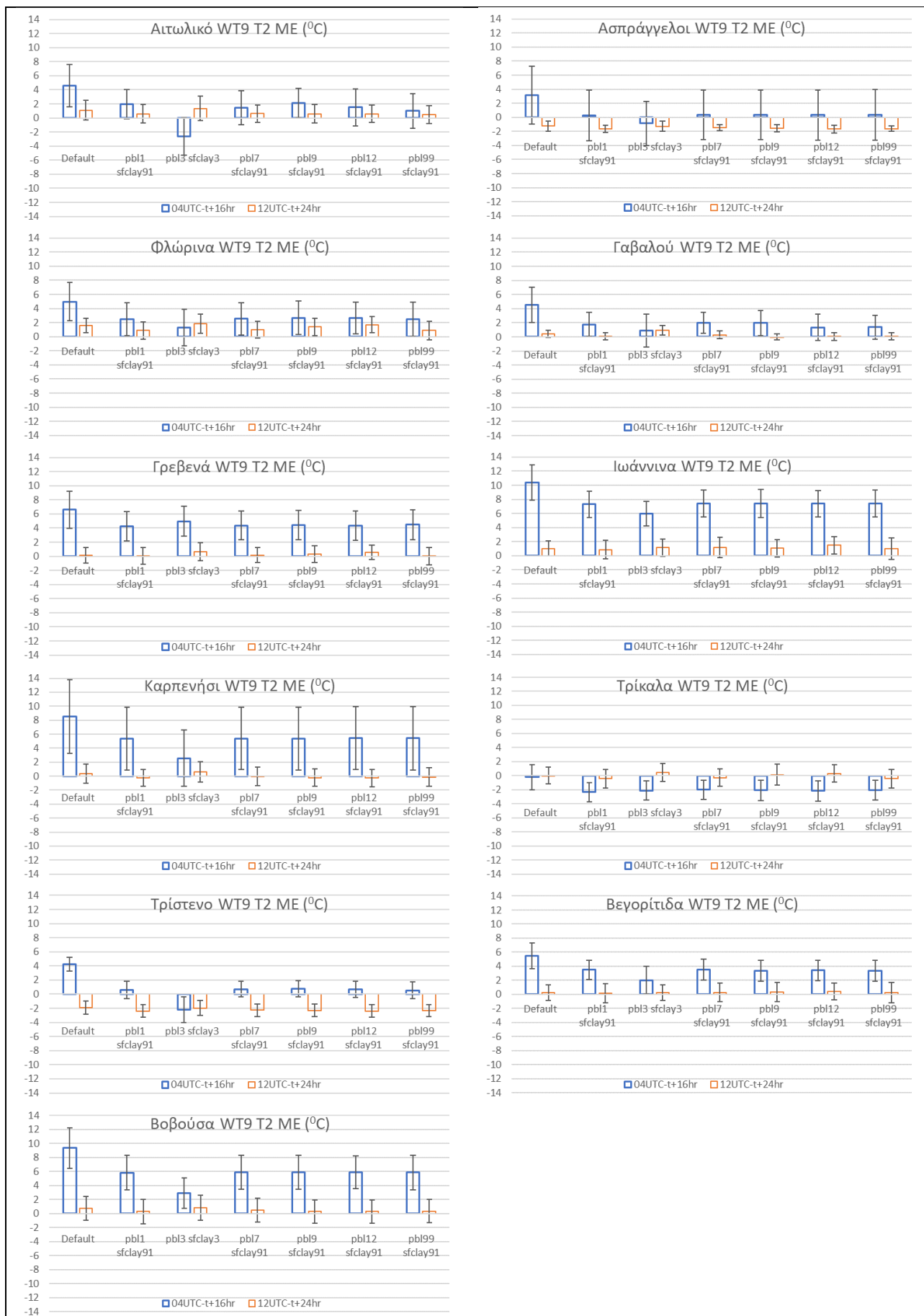
Στον μετεωρολογικό σταθμό των Τρικάλων, παρατηρείται ότι οι επιλεγμένες παραμετροποιήσεις, για τις οποίες παρουσιάζεται τάση υποεκτίμησης στις 04 UTC που κυμαίνεται από 2.0°C έως 2.4°C , δε φαίνεται να συμβάλουν ουσιαστικά στη βελτίωση των αποτελεσμάτων πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC, ενώ στις 12 UTC όλες οι παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν ικανοποιητικές προγνώσεις θερμοκρασίας με τιμές ME που προσεγγίζουν το μηδέν.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Τρίστενο, τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC, παρουσιάζονται για την παραμετροποίηση pbl99 sfclay91 με τιμή ME $0.5 \pm 1.2^\circ\text{C}$, με τις υπόλοιπες παραμετροποιήσεις να ακολουθούν εμφανίζοντας μικρή υπερεκτίμηση θερμοκρασίας, εκτός της παραμετροποίησης pbl3 sfclay3, η οποία παρουσιάζει υποεκτίμηση κατά 2.2°C . Στις 12 UTC όλες οι επιλεγμένες παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν υποεκτίμηση της θερμοκρασίας που κυμαίνεται από 2.0°C έως 2.4°C , τιμές οι οποίες αποκλίνουν περισσότερο από τις παρατηρήσεις σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν χρησιμοποιώντας τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Βεγορίτιδας, τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC εμφανίζονται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμή ME $2.0 \pm 2.0^\circ\text{C}$, ενώ οι υπόλοιπες παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν συστηματική υπερεκτίμηση της θερμοκρασίας που κυμαίνεται από 3.3°C έως 3.5°C . Στις 12 UTC το μοντέλο εμφανίζει πολύ καλή πρόγνωση θερμοκρασίας για όλες τις παραμετροποιήσεις με τις τιμές ME να προσεγγίζουν το μηδέν.

Στον μετεωρολογικό σταθμό της Βοβούσας, παρατηρείται μια γενικευμένη εικόνα υπερεκτίμησης της θερμοκρασίας στις 04 UTC για όλες τις παραμετροποιήσεις. Τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC με τιμή ME $2.9 \pm 2.1^\circ\text{C}$ παρατηρούνται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3, η οποία συμβάλει ουσιαστικά στη βελτίωση της πρόγνωσης από το μοντέλο μειώνοντας την τιμή του ME που παρατηρείται στις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις κατά 6.5°C . Οι υπόλοιπες παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν την ίδια υπερεκτίμηση των τιμών θερμοκρασίας στις 04 UTC κατά 6.0°C περίπου. Για τη θερμοκρασία στις 12 UTC, παρατηρείται γενικά μια καλή πρόγνωση από το μοντέλο για σχεδόν όλες τις παραμετροποιήσεις με τιμές ME που κυμαίνονται αρκετά κοντά στο μηδέν, εκτός της παραμετροποίησης pbl3 sfclay3 που εμφανίζει λίγο μεγαλύτερη απόκλιση με τιμή ME $0.9 \pm 1.8^\circ\text{C}$.

Για τον WT9, η παραμετροποίηση pbl3 sfclay3, όπως και σε προηγούμενους WTs, παρουσιάζεται συχνά ως η καλύτερη επιλογή για αρκετούς μετεωρολογικούς σταθμούς, ιδιαίτερα για τις προγνώσεις θερμοκρασίας στις 04 UTC, με σημαντική βελτίωση των προγνώσεων θερμοκρασίας που παρατηρούνται χρησιμοποιώντας τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις.



Σχήμα 3.39. Όπως στο Σχήμα 3.35, αλλά για τον WT9.

Από την εξέταση των αποτελεσμάτων για τον WT10 (Σχήμα 3.40), προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για καθέναν από τους μετεωρολογικούς σταθμούς:

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Αιτωλικό, η φυσική παραμετροποίηση pbl9 sfclay91 παρουσιάζει τις καλύτερες προγνώσεις θερμοκρασίας στις 04 UTC με τιμή ME $0.0 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$, με όλες τις υπόλοιπες φυσικές παραμετροποιήσεις να παρουσιάζουν γενικά μια καλύτερη πρόγνωση θερμοκρασίας στις 04 UTC, η οποία υπερέχει αυτής με τις προεπιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις. Η φυσική παραμετροποίηση pbl12 sfclay91 παρουσιάζει τις καλύτερες τιμές πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 12 UTC με τιμή ME $0.1 \pm 0.6^{\circ}\text{C}$, με τις υπόλοιπες παραμετροποιήσεις να ακολουθούν τις καλές προγνωστικές τιμές θερμοκρασίας, εκτός της παραμετροποίησης pbl3 sfclay3 που εμφανίζει υπερεκτίμηση θερμοκρασίας στις 12 UTC με τιμή ME $2.3 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Ασπράγγελοι, όλες οι επιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν μια καλή πρόγνωση θερμοκρασίας στις 04 UTC, με τις τιμές ME να κυμαίνονται κοντά στο μηδέν. Η παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 εμφανίζει τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασιών στις 12 UTC με τιμή ME $-1.2 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$, με τις υπόλοιπες παραμετροποιήσεις να εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά με υποεκτίμηση θερμοκρασίας της τάξης των 2°C .

Για τον μετεωρολογικό σταθμό της Φλώρινας παρατηρείται ουσιαστική βελτίωση της πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμή ME $-0.3 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$, με όλες τις υπόλοιπες παραμετροποιήσεις να εμφανίζουν γενικευμένη εικόνα μικρής υπερεκτίμησης της τάξης των 1.5°C . Οι τιμές θερμοκρασίας στις 12 UTC προβλέπονται από μοντέλο καλύτερα επίσης για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμή ME $-0.3 \pm 0.8^{\circ}\text{C}$, με τις υπόλοιπες παραμετροποιήσεις να εμφανίζουν γενικευμένη εικόνα υποεκτίμησης της τάξης των 1.3°C , εκτός αυτής των προεπιλεγμένων φυσικών παραμετροποιήσεων που παρουσιάζει εξίσου καλά αποτελέσματα πρόγνωσης.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Γαβαλού, όλες οι επιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν καλή πρόγνωση θερμοκρασίας στις 04 UTC, με τις τιμές ME να κυμαίνονται γύρω από τους 0.6°C , εκτός της παραμετροποίησης pbl3 sfclay3 που εμφανίζει μεγάλη διασπορά τιμών και ελαφριά υποεκτίμηση θερμοκρασίας με τιμή ME $-0.9 \pm 2.9^{\circ}\text{C}$. Στις 12 UTC για όλες τις φυσικές παραμετροποιήσεις παρατηρούνται μεγαλύτερες αποκλίσεις τιμών θερμοκρασίας (είτε υποεκτίμηση, είτε υπερεκτίμηση) σε σχέση με τις προεπιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις που δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα πρόγνωσης.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Γρεβενών, όλες οι επιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν εικόνα υπερεκτίμησης της θερμοκρασίας στις 04 UTC που κυμαίνεται από 2.5°C μέχρι 3.3°C , με την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 να εμφανίζει τα καλύτερα αποτελέσματα μεταξύ αυτών με τιμή ME $2.5 \pm 1.3^{\circ}\text{C}$. Όσον αφορά τις τιμές πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 12 UTC, σχεδόν όλες οι παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν υποεκτίμηση της τάξης περίπου των 2°C , ενώ οι καλύτερες τιμές εμφανίζονται ξανά για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμή ME $-1.1 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$.

Για τον μετεωρολογικό σταθμό των Ιωαννίνων, ο οποίος είναι ένα από τους σταθμούς που εμφανίζει μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ πρόγνωσης – παρατήρησης, όλες οι επιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις εμφανίζουν συστηματικά μεγάλες τιμές υπερεκτίμησης των θερμοκρασιών στις 04 UTC, ενώ παρατηρείται ότι υπάρχει μικρή βελτίωση στις παραμετροποιήσεις που δοκιμάστηκαν στις 04 UTC. Οι καλύτερες τιμές εμφανίζονται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 με τιμή ME $3.6 \pm 0.6^{\circ}\text{C}$. Και σε αυτή την περίπτωση πάντως υπάρχει αξιοσημείωτη υπερεκτίμηση της

θερμοκρασίας. Για τη θερμοκρασία στις 12 UTC, παρατηρείται γενικά καλή πρόγνωση σχεδόν για όλες τις παραμετροποιήσεις, με τις τιμές ME να κυμαίνονται από 0.3°C έως -0.7°C .

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Καρπενήσι, εμφανίζονται μεγάλες αποκλίσεις από τις παρατηρήσεις και η μεγαλύτερη διασπορά των τιμών πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC μεταξύ όλων των σταθμών σε συγκεκριμένες παραμετροποιήσεις, όπως εμφανίστηκε και στον WT9. Υπάρχει μια δυσκολία πρόγνωσης της θερμοκρασίας από το μοντέλο στις 04 UTC για αρκετές παραμετροποιήσεις, οι οποίες παρουσιάζουν και μια γενικευμένη εικόνα υπερεκτίμησης της θερμοκρασίας. Εντούτοις, η παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας σε συνδυασμό με τη μικρότερη διασπορά τιμών στις 04 UTC με τιμή ME $2.5\pm 1.5^{\circ}\text{C}$, η οποία είναι η μόνη που συμβάλλει ουσιαστικά στη βελτίωση της πρόγνωσης. Για τη θερμοκρασία στις 12 UTC, παρατηρείται γενικά μια καλή πρόγνωση από το μοντέλο για όλες τις παραμετροποιήσεις εκτός της παραμετροποίησης pbl9 sfclay91, για την οποία εμφανίζεται η μεγαλύτερη απόκλιση τιμών με τιμή ME $-1.8\pm 0.9^{\circ}\text{C}$.

Στον μετεωρολογικό σταθμό των Τρικάλων, παρατηρείται, όπως και για τον WT9, ότι οι επιλεγμένες παραμετροποιήσεις, οι οποίες παρουσιάζουν τάση υποεκτίμησης των θερμοκρασιών στις 04 UTC που κυμαίνεται από 3.0°C έως 3.6°C , δε φαίνεται να συμβάλουν αρκετά στη βελτίωση της πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC. Επίσης και στις 12 UTC εμφανίζεται μια τάση μικρής υποεκτίμησης των τιμών για όλες τις παραμετροποιήσεις με τιμές ME που κυμαίνονται από -0.4°C έως -2.0°C . Γενικά, όπως παρατηρείται και για τον WT9, οι καλύτερες προγνώσεις θερμοκρασίας εμφανίζονται για τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις.

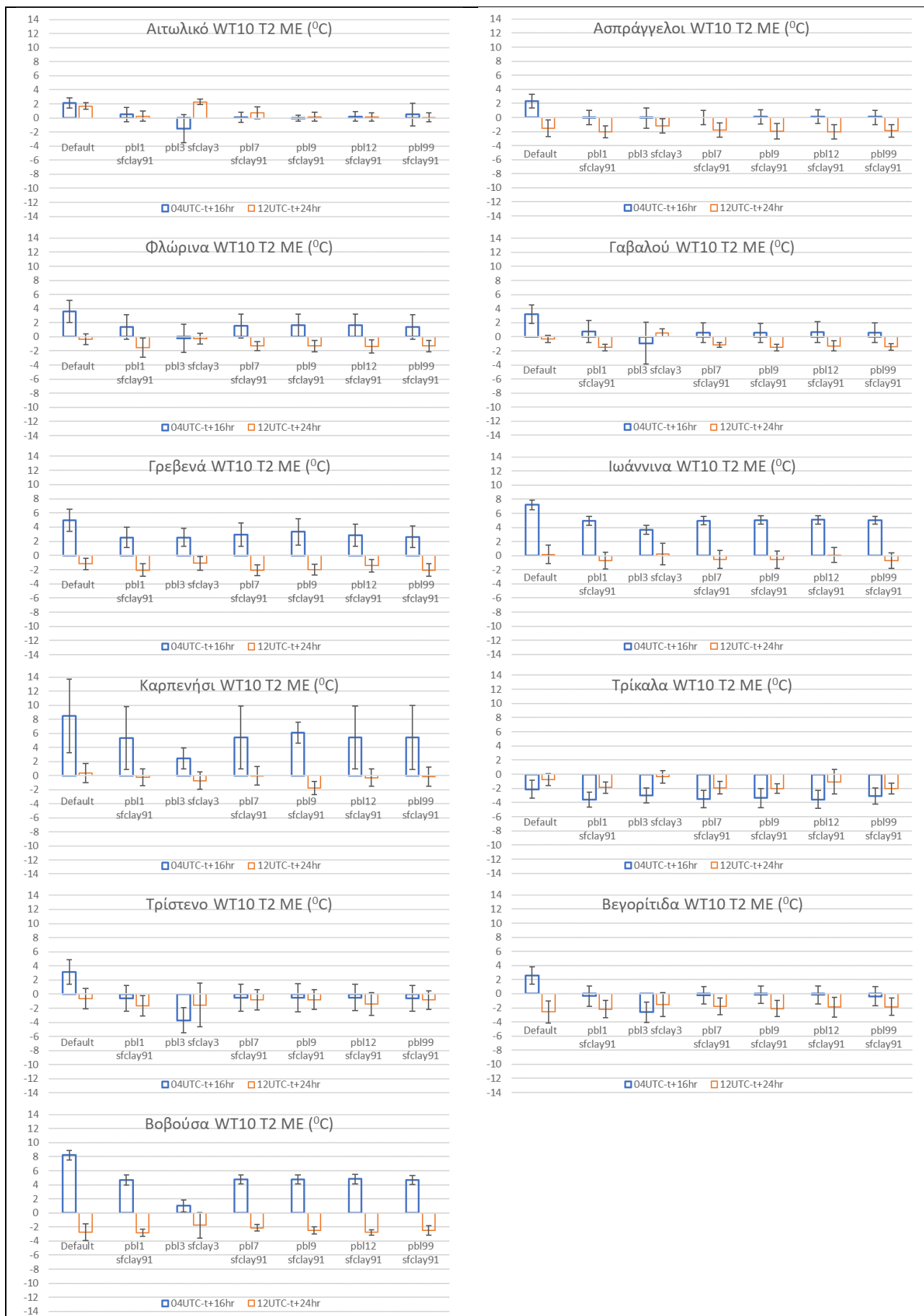
Για τον μετεωρολογικό σταθμό Τρίστονο, όλες σχεδόν οι επιλεγμένες παραμετροποιήσεις εμφανίζουν γενικά καλά αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC, εκτός της παραμετροποίησης pbl3 sfclay3, η οποία παρουσιάζει υποεκτίμηση τιμών κατά 3.7°C . Στις 12 UTC όλες οι επιλεγμένες παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν υποεκτίμηση των τιμών θερμοκρασίας (λίγο μεγαλύτερη από αυτή των προεπιλεγμένων παραμετροποιήσεων) που κυμαίνεται από 0.8°C έως 1.6°C .

Για τον μετεωρολογικό σταθμό Βεγορίτιδα, πολύ καλά αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC εμφανίζονται σχεδόν για όλες τις επιλεγμένες παραμετροποιήσεις εκτός της παραμετροποίησης pbl3 sfclay3 που έχει τιμή ME $-2.6\pm 1.4^{\circ}\text{C}$. Στις 12 UTC το μοντέλο εμφανίζει μια εικόνα υποεκτίμησης της θερμοκρασίας για όλες τις παραμετροποιήσεις με τις τιμές να κυμαίνονται από 1.5°C έως 2.2°C . Οι τιμές αυτές είναι ελαφρώς βελτιωμένες σε σχέση με αυτές που προκύπτουν από τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις.

Στον μετεωρολογικό σταθμό της Βοβούσας, παρατηρείται μια γενικευμένη εικόνα συστηματικής υπερεκτίμησης των τιμών θερμοκρασίας στις 04 UTC για όλες σχεδόν τις παραμετροποιήσεις. Τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 04 UTC με τιμή ME $1.0\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ παρατηρούνται για την παραμετροποίηση pbl3 sfclay3, η οποία συμβάλλει ουσιαστικά στη βελτίωση της πρόγνωσης από το μοντέλο, μειώνοντας την τιμή του ME που παρατηρείται στις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις κατά 7.2°C . Οι υπόλοιπες επιλεγμένες παραμετροποιήσεις παρουσιάζουν την ίδια υπερεκτίμηση της θερμοκρασίας στις 04 UTC κατά περίπου 4.8°C . Για τις τιμές πρόγνωσης θερμοκρασίας στις 12 UTC, παρατηρείται μια εικόνα υποεκτίμησης που κυμαίνεται από 1.7°C (εμφανίζεται στην παραμετροποίηση pbl3 sfclay3) έως 2.8°C .

Για τον WT10, η παραμετροποίηση `pb13 sfclay3` εμφανίζεται συχνά ως η καλύτερη επιλογή για τις προγνώσεις θερμοκρασίας, ιδιαίτερα στις 04 UTC, ωστόσο σε κάποιους σταθμούς (π.χ. Τρίστενο, Βεγορίτιδα) παρατηρείται αξιοσημείωτη υποεκτίμηση των θερμοκρασιών.

Λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο που το μοντέλο WRF προσομοιώνει τις μετεωρολογικές παραμέτρους της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του ανέμου καθ' ύψος, για διάφορες φυσικές παραμετροποιήσεις που χρησιμοποιούνται, παρέχονται στο Παράρτημα Γ. Στο Παράρτημα Γ παρουσιάζεται γραφικά η θερμοκρασία και η ταχύτητα του ανέμου καθ' ύψος για τα πλησιέστερα πλεγματικά σημεία στους μετεωρολογικούς σταθμούς που μελετώνται, για την πλησιέστερη ημέρα στο κέντρο κάθε συστάδας των WT9 και WT10 στις 04 UTC.



Σχήμα 3.40. Όπως στο Σχήμα 3.35, αλλά για τον WT10.

3.5 Αποτελέσματα πρόγνωσης υετού για διάφορες φυσικές παραμετροποιήσεις

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας μελέτης σύγκρισης και βελτίωσης των αποτελεσμάτων πρόγνωσης του υετού για τον WT3, με την εφαρμογή αλλαγών σε κάποιες από τις βασικές φυσικές παραμετροποιήσεις του μοντέλου WRF.

Από την ανάλυση των δεδομένων συμβάντων υετού ανά WT που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3.3 προκύπτει ότι οι WT3 και WT8 εμφανίζουν τα περισσότερα συμβάντα υετού. Ακόμη παρατηρείται ότι ο WT3 εμφανίζει τα περισσότερα συμβάντα υετού σε όλους τους μετεωρολογικούς σταθμούς και σε όλα τα κατώφλια υετού και για αυτό χρησιμοποιείται αποκλειστικά αυτός ο WT που θεωρείται κατάλληλος για την προσπάθεια βελτίωσης των αποτελεσμάτων πρόγνωσης. Να επισημανθεί ότι ο WT3 εμφανίζει γενικά μεγάλα ποσά υετού κατά την ψυχρή περίοδο του έτους και θεωρείται ως ένας WT που χαρακτηρίζεται και από ακραίες τιμές υετού.

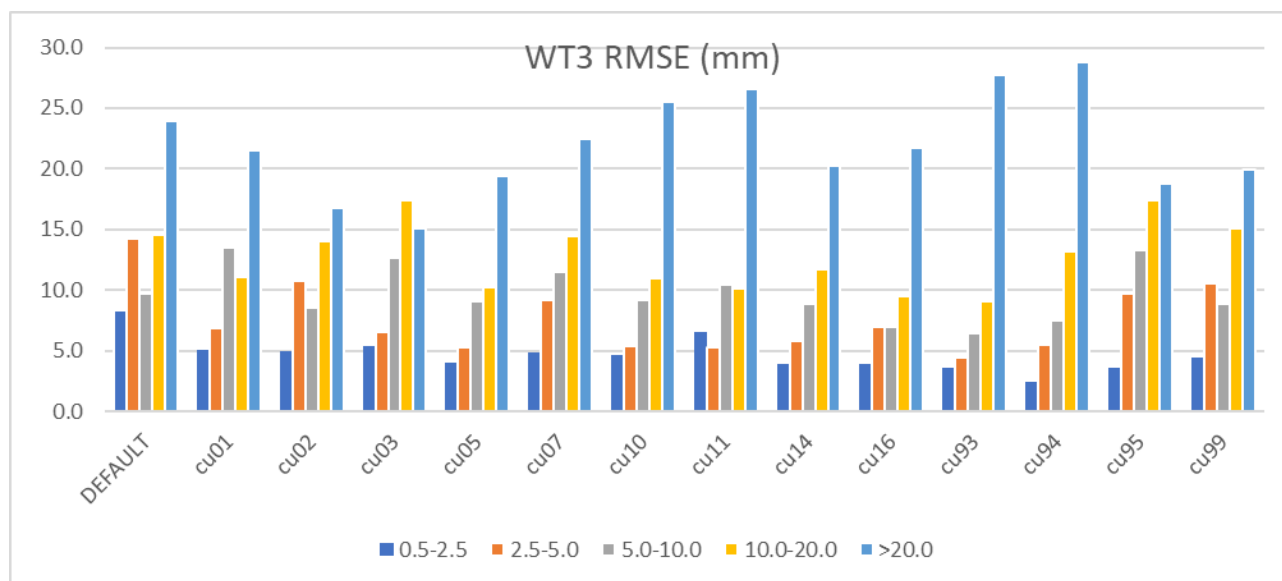
Οι φυσικές παραμετροποιήσεις που ελέγχονται σε αυτό το μέρος της διδακτορικής διατριβής αφορούν α) την ανωμεταφορά (φυσική δημιουργίας σωρειτόμορφων νεφών, cumulus parameterization) και β) τη μικροφυσική (φυσική νεφών, microphysics) που αναφέρονται στους Πίνακες 2.8 και 2.9 αντίστοιχα και περιλαμβάνουν σχεδόν όλες τις δυνατές παραμετροποιήσεις που προσφέρονται στην έκδοση του μοντέλου WRF που χρησιμοποιείται. Αυτές οι παραμετροποιήσεις χρησιμοποιούνται διότι παίζουν σημαντικό ρόλο στη δημιουργία και ανάπτυξη νεφών και έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στις προγνωστικές τιμές υετού. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι αλλαγές της παραμετροποίησης ανωμεταφοράς αφορούν μόνο τις περιοχές εκτέλεσης του μοντέλου της Ευρώπης και της Ελλάδας και όχι της ΒΔ Ελλάδας, στην οποία η αναφερόμενη παραμετροποίηση απενεργοποιείται λόγω υψηλής οριζόντιας ανάλυσης του μοντέλου.

Για τη μελέτη αυτή, το μοντέλο WRF εκτελείται κάθε φορά με μια διαφορετική φυσική παραμετροποίηση, από αυτές των Πινάκων 2.8 και 2.9, για τις 6 πλησιέστερες ημέρες στο κέντρο της συστάδας του WT3. Η εκτέλεση του μοντέλου WRF στη διαδικασία βελτιστοποίησης γίνεται για τον έλεγχο των δεδομένων πρόγνωσης υετού 24ωρών της πρώτης ημέρας, δεδομένου ότι στα αποτελέσματα αξιολόγησης υετού του μοντέλου δεν προέκυψαν σχετικά σημαντικές διαφοροποιήσεις ανάλογα τα κατώφλια υετού και τον WT, σε σχέση με τη δεύτερη ημέρα πρόγνωσης, αλλά μια γενικευμένη εικόνα χειρότερης προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου κατά τη δεύτερη ημέρα πρόγνωσης. Επίσης, ένας παράγοντας που έπαιξε ρόλο στον μη έλεγχο των τιμών υετού της δεύτερης ημέρας πρόγνωσης, είναι η μεγαλύτερη αβεβαιότητα της δεύτερης ημέρας πρόγνωσης σε συνδυασμό με το μικρότερο δείγμα δεδομένων λόγω εκτέλεσης του μοντέλου για τις 6 πλησιέστερες ημέρες στο κέντρο του WT3. Όπως πραγματοποιείται και στη διαδικασία της αξιολόγησης των προγνωστικών τιμών υετού του Κεφαλαίου 3.3, και για τη μελέτη αυτή υπολογίζονται οι στατιστικές συναρτήσεις που βασίζονται σε κατηγορίες ημερήσιων προγνωστικών τιμών υετού και οι συναρτήσεις επίδοσης που βασίζονται στους υπολογισμούς πινάκων συνάφειας χρησιμοποιώντας κατώφλια ημερήσιων τιμών υετού.

Στα Σχήματα 3.41, 3.42 και 3.43, παρουσιάζονται για όλες τις φυσικές παραμετροποιήσεις οι τιμές της συνάρτησης RMSE για την πρώτη ημέρα πρόγνωσης (αθροιστικές τιμές υετού P από t+12h έως t+36h) για πέντε κατηγορίες: (α) $\geq 0.5\text{mm}$ P < 2.5mm, (β) $\geq 2.5\text{mm}$ P < 5.0mm, (γ) $\geq 5.0\text{mm}$ P < 10.0mm, (δ) $\geq 10.0\text{mm}$ P < 20.0mm και (ε) P ≥ 20.0 mm και για τον WT3. Η συνάρτηση αυτή εκφράζει τα σφάλματα που προκύπτουν από τη σύγκριση παρατηρήσεων και προγνώσεων, επιτρέποντας τη διάκριση των μεγαλύτερων σφαλμάτων ανάλογα με την παραμετροποίηση.

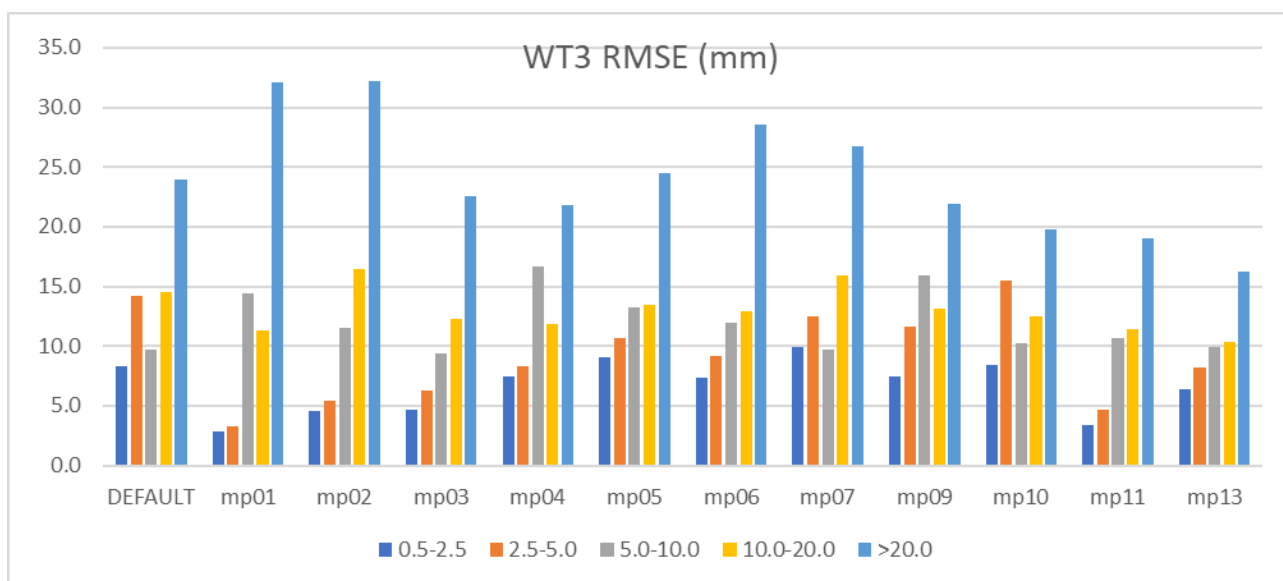
Ακόμη, στα Σχήματα 3.44 – 3.49 παρουσιάζονται η συνάρτηση επίδοσης FBI (δείκτης υπερεκτίμησης / υποεκτίμησης υετού) και ο ΣΔ, που συνοψίζει τα αποτελέσματα των συναρτήσεων επίδοσης PC, POD, FAR, CSI και GSS, που υπολογίζονται χρησιμοποιώντας πίνακες συνάφειας για πέντε κατώφλια υετού α) $>0.5\text{mm}$, β) $\geq 2.5\text{mm}$, γ) $\geq 5.0\text{mm}$, δ) $\geq 10.0\text{mm}$, και ε) $\geq 20.0\text{mm}$ και χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της επίδοσης του μοντέλου ως προς τις ημερήσιες τιμές υετού. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2.2.6, ο υπολογισμός των συναρτήσεων επίδοσης και του ΣΔ, γίνεται με την κατασκευή ενός πίνακα συνάφειας ανά κατώφλι υετού για το σύνολο των ημερών του WT3 και των μετεωρολογικών σταθμών για κάθε παραμετροποίηση. Αυτό οδηγεί σε ένα σύνολο 102 περιπτώσεων (6 ημέρες x 17 σταθμοί = 102). Η κατανομή των συμβάντων υετού σε κατώφλια για τον υπολογισμό των συναρτήσεων επίδοσης στη μελέτη αυτή έχει ως εξής, α) 85 στο κατώφλι $>0.5\text{mm}$, β) 70 στο κατώφλι $\geq 2.5\text{mm}$, γ) 64 στο κατώφλι $\geq 5.0\text{mm}$, δ) 53 στο κατώφλι $\geq 10.0\text{mm}$, και ε) 28 στο κατώφλι $\geq 20.0\text{mm}$

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 3.41, υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές στις τιμές του RMSE που εμφανίζονται για τις διαφορετικές παραμετροποιήσεις ανωμεταφοράς. Οι τιμές αυτές είναι είτε καλύτερες είτε χειρότερες από αυτές των προεπιλεγμένων φυσικών παραμετροποιήσεων. Ανάλογα το εύρος υετού που εξετάζεται προκύπτουν οι καλύτερες και χειρότερες παραμετροποιήσεις. Ποιο συγκεκριμένα, στο εύρος τιμών ημερήσιου υετού ($P < 2.5\text{mm}$ (15 συμβάντα υετού)) τα μικρότερα σφάλματα παρατηρούνται για τις παραμετροποιήσεις με κωδικοποιήσεις cu94, cu93 και cu95, με αντίστοιχες τιμές RMSE 2.4mm, 3.6mm και 3.6mm, ενώ τα μεγαλύτερα σφάλματα παρατηρούνται στις προεπιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις με τιμή RMSE 8.3mm. Στο εύρος τιμών υετού $\geq 2.5\text{mm}$ $P < 5.0\text{mm}$ (6 συμβάντα υετού) τα μικρότερα σφάλματα παρατηρούνται για την παραμετροποίηση με κωδικοποίηση cu93 με τιμή RMSE 4.5mm με τις παραμετροποιήσεις cu05 και cu11 να ακολουθούν με τιμή RMSE 5.3mm, ενώ τα μεγαλύτερα σφάλματα παρατηρούνται ξανά για τις προεπιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις με τιμή RMSE 14.2mm. Στο εύρος τιμών υετού $\geq 5.0\text{mm}$ $P < 10.0\text{mm}$ (11 συμβάντα υετού) τα μικρότερα σφάλματα παρατηρούνται για τις παραμετροποιήσεις με κωδικοποιήσεις cu93, cu16 και cu94, με τιμές RMSE 6.4mm, 7.0mm και 7.5mm αντίστοιχα, ενώ τα μεγαλύτερα σφάλματα παρατηρούνται στις παραμετροποιήσεις cu01 και cu95 με τιμές RMSE 13.5mm και 13.3mm αντίστοιχα. Στο εύρος τιμών υετού $\geq 10.0\text{mm}$ $P < 20.0\text{mm}$ (25 συμβάντα υετού) τα μικρότερα σφάλματα παρατηρούνται, όπως και προηγουμένως, για τις παραμετροποιήσεις με κωδικοποιήσεις cu93 και cu16 με αντίστοιχες τιμές RMSE 9.1mm και 9.5mm, ενώ τα μεγαλύτερα σφάλματα παρατηρούνται στις παραμετροποιήσεις cu03 και cu95 με τιμή RMSE 17.4mm. Τέλος, στο κατώφλι τιμών υετού $\geq 20.0\text{mm}$ (28 συμβάντα υετού) τα μικρότερα σφάλματα παρατηρούνται, για την παραμετροποίηση με κωδικοποίηση cu03 με τιμή RMSE 15.1mm, με τις παραμετροποιήσεις cu02 και cu95 να ακολουθούν με αντίστοιχες τιμές RMSE 16.8mm και 18.8mm, ενώ τα μεγαλύτερα σφάλματα παρατηρούνται στην παραμετροποίηση cu94 με τιμή RMSE 28.8mm, με τις παραμετροποιήσεις cu93, cu11 και cu10 να ακολουθούν με αντίστοιχες τιμές RMSE 27.7mm, 26.6mm και 25.5mm. Γενικά, παρατηρούνται διαφοροποιήσεις μεταξύ των παραμετροποιήσεων ανωμεταφοράς ανάλογα το εύρος του παρατηρούμενου υετού. Έτσι υπάρχουν παραμετροποιήσεις που δίνουν καλές τιμές πρόγνωσης για μικρές ποσότητες υετού, όπως οι cu93 και cu94, ενώ άλλες όπως οι παραμετροποιήσεις cu03 και cu02 δίνουν καλές τιμές πρόγνωσης για μεγάλες ποσότητες υετού.

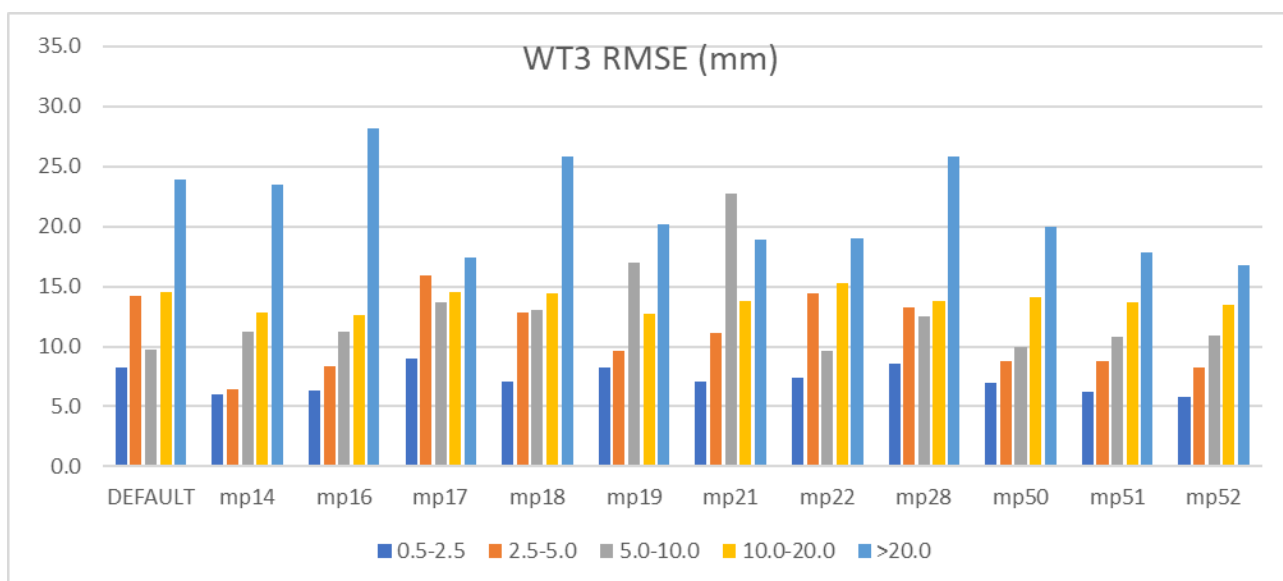


Σχήμα 3.41. Γραφική απεικόνιση του RMSE (mm) των τιμών πρόγνωσης – παρατήρησης 24ώρου υετού, για την πρώτη (t+12h έως t+36h) ημέρα πρόγνωσης για τον WT3, για πέντε κλάσεις υετού, για τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις (Default) και για άλλες 13 παραμετροποιήσεις ανωμεταφοράς με κωδικοποίηση cu01 έως cu99 (βλέπε Πίνακα 2.8).

Όπως παρατηρείται στα Σχήματα 3.42 και 3.43, υπάρχουν μεγάλες διαφορές στις τιμές του RMSE που εμφανίζονται για τις διαφορετικές παραμετροποιήσεις μικροφυσικής, ανάλογα το εύρος υετού. Ποιο συγκεκριμένα, στο εύρος τιμών υετού $\geq 0.5\text{mm P} < 2.5\text{mm}$ (15 συμβάντα υετού) τα μικρότερα σφάλματα μεταξύ όλων των παραμετροποιήσεων μικροφυσικής παρατηρούνται για τις κωδικοποιήσεις mr01 και mr11, με αντίστοιχες τιμές RMSE 2.8mm και 3.4mm, ενώ τα μεγαλύτερα σφάλματα παρατηρούνται στις παραμετροποιήσεις mr07, mr05 και mr17 με αντίστοιχες τιμές RMSE 9.9mm, 9.0mm και 9.0mm. Στο εύρος τιμών υετού $\geq 2.5\text{mm P} < 5.0\text{mm}$ (6 συμβάντα υετού) τα μικρότερα σφάλματα παρατηρούνται, όπως και προηγουμένως, για τις παραμετροποιήσεις mr01 και mr11, με αντίστοιχες τιμές RMSE 3.2mm και 4.7mm, ενώ τα μεγαλύτερα σφάλματα παρατηρούνται για τις παραμετροποιήσεις mr17 και mr10 με αντίστοιχες τιμές RMSE 15.9mm, 15.5mm. Στο εύρος τιμών υετού $\geq 5.0\text{mm P} < 10.0\text{mm}$ (11 συμβάντα υετού) τα μικρότερα σφάλματα παρατηρούνται για την παραμετροποίηση με κωδικοποίηση mr03, με τιμή RMSE 9.4mm, ενώ τα μεγαλύτερα σφάλματα εμφανίζονται για την παραμετροποίηση με κωδικοποίηση mr21, με τιμή RMSE 22.7mm. Στο εύρος τιμών υετού $\geq 10.0\text{mm P} < 20.0\text{mm}$ (25 συμβάντα υετού) τα μικρότερα σφάλματα παρατηρούνται, για την παραμετροποίηση με κωδικοποίηση mr13, με τιμή RMSE 10.4mm, ενώ τα μεγαλύτερα σφάλματα εμφανίζονται για την παραμετροποίηση με κωδικοποίηση mr02, με τιμή RMSE 16.4mm. Στο κατώφλι τιμών υετού $\text{P} \geq 20.0\text{mm}$ (28 συμβάντα υετού) τα μικρότερα σφάλματα παρατηρούνται για την παραμετροποίηση με κωδικοποίηση mr13 με τιμή RMSE 16.2mm με την παραμετροποίηση mr52 να ακολουθεί με τιμή RMSE 16.8mm, ενώ τα μεγαλύτερα σφάλματα παρατηρούνται για τις παραμετροποιήσεις mr02 και mr01, με αντίστοιχες τιμές RMSE 32.2mm και 32.1mm. Στις παραμετροποιήσεις μικροφυσικής παρατηρούνται αρκετές διαφοροποιήσεις στις τιμές RMSE, ανάλογα τα εύρη υετού που εξετάζονται κάθε φορά. Φαίνεται ότι το μοντέλο δίνει καλύτερες τιμές πρόγνωσης για τις παραμετροποιήσεις mr01 και mr11 σε συμβάντα με μικρές ποσότητες υετού, ενώ σε συμβάντα με μεγάλες ποσότητες υετού η παραμετροποίηση mr13 φαίνεται να υπερέχει των άλλων στις τιμές πρόγνωσης υετού.



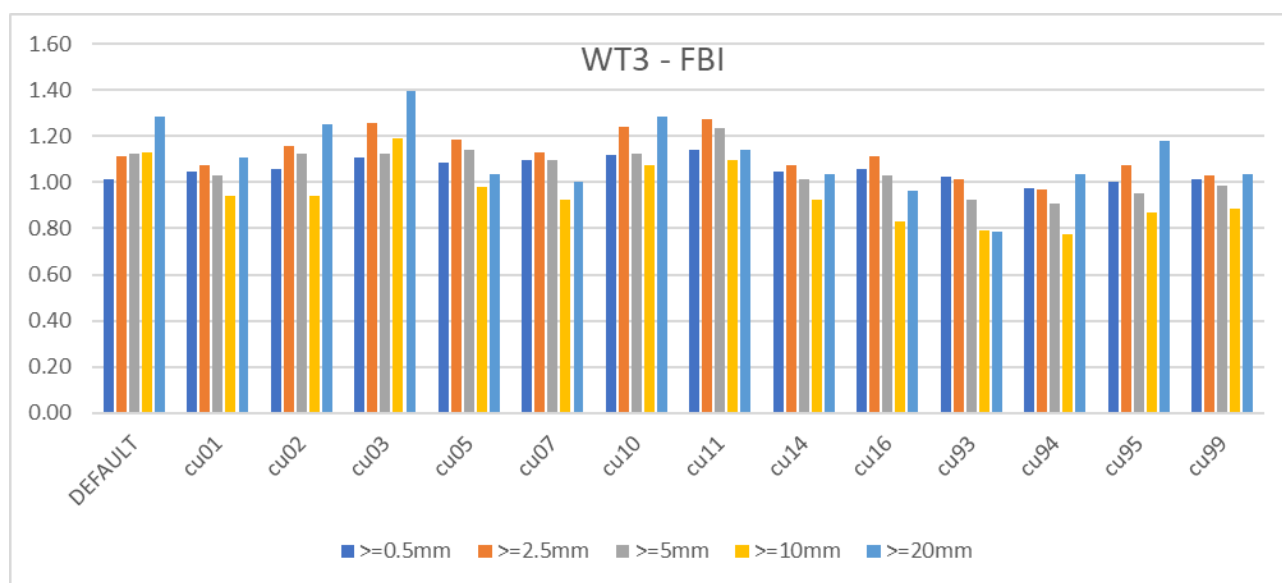
Σχήμα 3.42. Όπως στο Σχήμα 3.41, αλλά και για άλλες 11 φυσικές παραμετροποιήσεις μικροφυσικής με κωδικοποίηση mp01 έως mp13 (βλέπε Πίνακα 2.9).



Σχήμα 3.43. Όπως στο Σχήμα 3.41, αλλά και για άλλες 11 φυσικές παραμετροποιήσεις μικροφυσικής με κωδικοποίηση mp14 έως mp52 (βλέπε Πίνακα 2.9).

Από την εξέταση των αποτελεσμάτων της συνάρτησης επίδοσης FBI για τις παραμετροποιήσεις ανωμεταφοράς (Σχήμα 3.44), μπορούν να προκύψουν συμπεράσματα σε ότι αφορά την υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση του νετού από το μοντέλο για κάθε παραμετροποίηση ανωμεταφοράς ανάλογα το κατώφλι νετού. Πιο συγκεκριμένα, στο κατώφλι $\geq 0.5\text{mm}$ (85 περιπτώσεις) οι περισσότερες παραμετροποιήσεις τείνουν στην τιμή 1 που σημαίνει ορθή πρόγνωση των τιμών νετού από το μοντέλο. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις της FBI από το 1 παρατηρούνται για τις παραμετροποιήσεις cu11 και cu10 με αντίστοιχες τιμές FBI 1.14 και 1.12, που υποδηλώνουν ότι

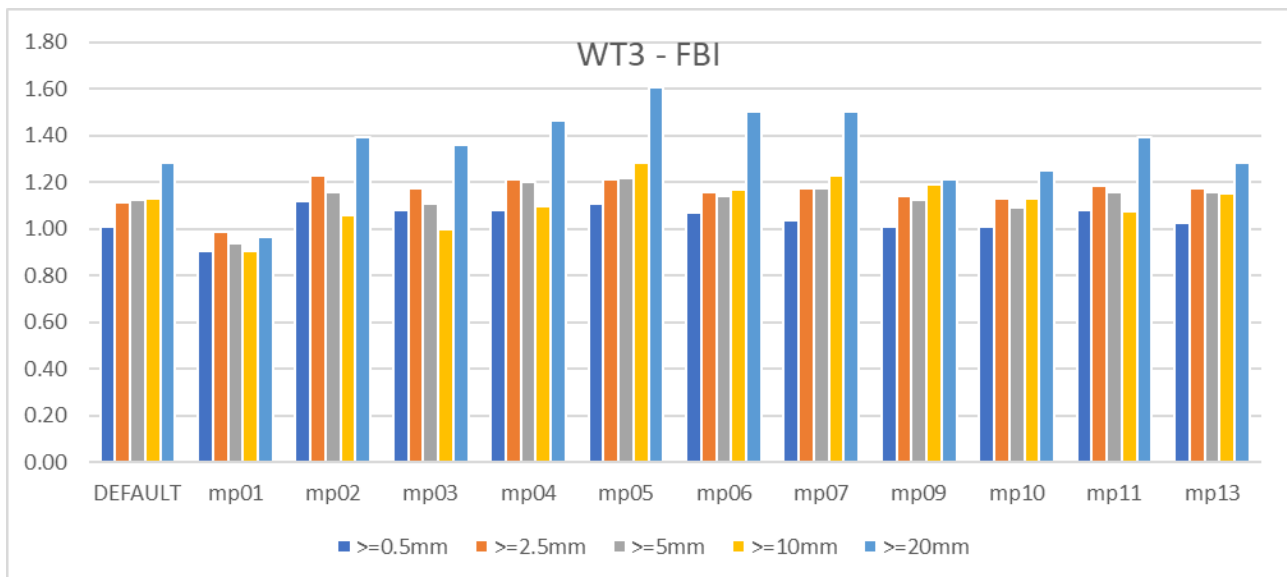
για αυτές τις παραμετροποιήσεις παρατηρείται μια μικρή υπερεκτίμηση του νετού από το μοντέλο. Στο κατώφλι $\geq 2.5\text{mm}$ (70 περιπτώσεις) παρατηρείται μια γενικευμένη υπερεκτίμηση του νετού, σχεδόν για όλες τις παραμετροποιήσεις, με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται για τις κωδικοποιήσεις cu11 (όπως και προηγουμένως) και cu03 με αντίστοιχες τιμές FBI 1.27 και 1.26. Στο κατώφλι $\geq 5.0\text{mm}$ (64 περιπτώσεις) παρατηρείται διαφοροποίηση των τιμών ανάλογα την παραμετροποίηση, με τις μεγαλύτερες υπερεκτιμήσεις να εμφανίζονται για την παραμετροποίηση cu11 με τιμή FBI 1.23, όπως συνέβη και στα προηγούμενα κατώφλια, και τις μεγαλύτερες υποεκτιμήσεις να παρατηρούνται για την παραμετροποίηση cu94 με τιμή FBI 0.91, ενώ τα καλύτερα αποτελέσματα της τιμής FBI που τείνουν κοντά στο 1 εμφανίζονται για τις παραμετροποιήσεις cu14 και cu99. Στο κατώφλι $\geq 10.0\text{mm}$ (53 περιπτώσεις) παρατηρείται για τις περισσότερες παραμετροποιήσεις (10 στον αριθμό) μια εικόνα υποεκτίμησης του νετού, με τις μεγαλύτερες αποκλίσεις να παρουσιάζονται για την παραμετροποίηση cu94 με τιμή FBI 0.77, ενώ η μεγαλύτερη υπερεκτίμηση νετού παρατηρείται για την παραμετροποίηση cu03 με τιμή FBI 1.19. Στο κατώφλι $\geq 20.0\text{mm}$ (28 περιπτώσεις) παρατηρείται αξιοσημείωτη διαφοροποίηση των τιμών ανάλογα την παραμετροποίηση, με αρκετές από αυτές να έχουν τιμές FBI που τείνουν στο 1 και όλες σχεδόν τις υπόλοιπες να εμφανίζουν μια εικόνα υπερεκτίμησης του νετού. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις υπερεκτίμησης νετού παρατηρούνται για την παραμετροποίηση cu03, όπως και στο προηγούμενο κατώφλι, με τιμή FBI 1.39, ενώ για την παραμετροποίηση cu93, με τιμή FBI 0.79, παρατηρείται η μεγαλύτερη υποεκτίμηση νετού.



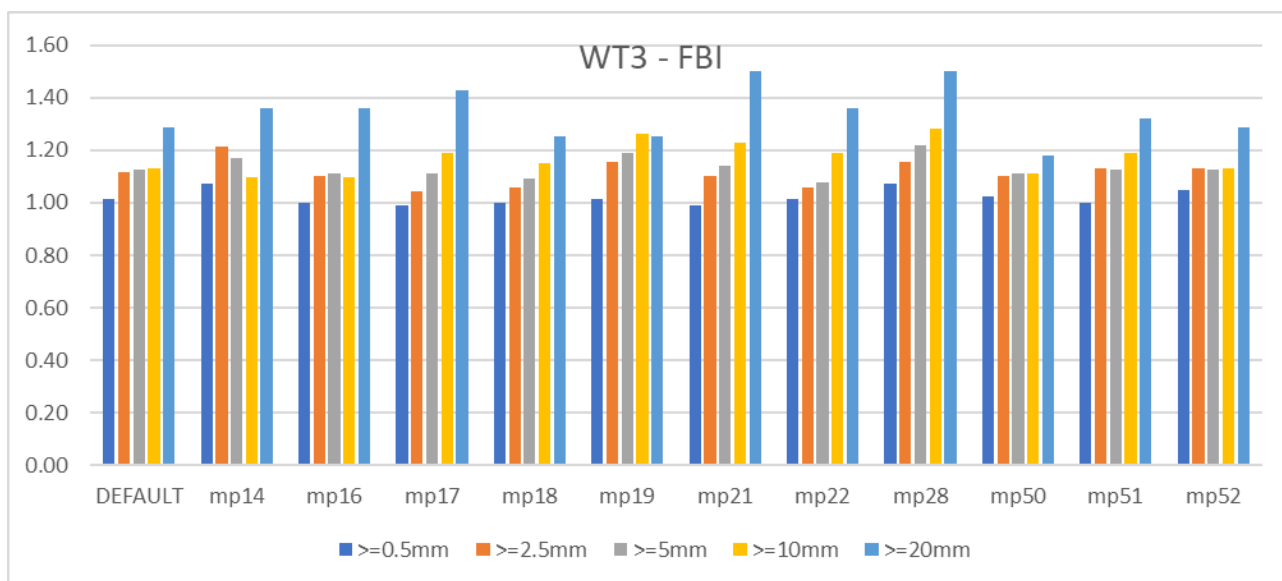
Σχήμα 3.44. Γραφική απεικόνιση του δείκτη FBI για την πρώτη ($t+12\text{h}$ έως $t+36\text{h}$) ημέρα πρόγνωσης για τον WT3 για πέντε κατώφλια νετού, για τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις (Default) και για άλλες 13 παραμετροποιήσεις ανωμεταφοράς με κωδικοποίηση cu01 έως cu99 (βλέπε Πίνακα 2.8).

Από την εξέταση των αποτελεσμάτων της συνάρτησης επίδοσης FBI, για τις παραμετροποιήσεις μικροφυσικής (Σχήματα 3.45 και 3.46) προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα: Στο κατώφλι $\geq 0.5\text{mm}$ οι περισσότερες παραμετροποιήσεις τείνουν πολύ κοντά στην τιμή 1 δηλαδή στην ακριβή πρόγνωση του νετού από το μοντέλο. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις της FBI από το 1 παρατηρούνται για τις παραμετροποιήσεις mp01 και mp02 με αντίστοιχες τιμές FBI 0.91

(υποεκτίμηση υετού) και 1.12 (υπερεκτίμηση υετού). Στο κατώφλι $\geq 2.5\text{mm}$ παρατηρείται μια γενικευμένη εικόνα υπερεκτίμησης των τιμών υετού σχεδόν για όλες τις παραμετροποιήσεις με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται για τις κωδικοποιήσεις mp02, mp04 και mp14 με τις αντίστοιχες τιμές FBI 1.23, 1.21 και 1.21. Στο κατώφλι $\geq 5.0\text{mm}$ παρατηρείται, όπως και στο προηγούμενο κατώφλι, μια γενικευμένη εικόνα υπερεκτίμησης του υετού σχεδόν για όλες τις παραμετροποιήσεις, με τις μεγαλύτερες υπερεκτιμήσεις να εμφανίζονται για τις παραμετροποιήσεις mp05 και mp28 με τιμή FBI 1.22. Στο κατώφλι $\geq 10.0\text{mm}$ παρατηρείται ξανά μια γενικευμένη εικόνα υπερεκτίμησης του υετού σχεδόν για όλες τις παραμετροποιήσεις, με τις μεγαλύτερες υπερεκτιμήσεις να εμφανίζονται για τις παραμετροποιήσεις mp05 και mp28, όπως και στο προηγούμενο κατώφλι, με τιμή FBI 1.28 και την καλύτερη τιμή FBI 1.00 να παρατηρείται στην παραμετροποίηση mp03. Στο κατώφλι $\geq 20.0\text{mm}$ παρατηρείται όπως στα προηγούμενα, μια γενική εικόνα υπερεκτίμησης του υετού με μεγαλύτερες αποκλίσεις, σχεδόν για όλες τις παραμετροποιήσεις. Οι μεγαλύτερες υπερεκτιμήσεις υετού εμφανίζονται για την παραμετροποίηση mp05, όπως και στο προηγούμενο κατώφλι, με τιμή FBI 1.61 και ακολουθούν οι παραμετροποιήσεις mp06, mp07, mp21 και mp28 με ίδια τιμή FBI 1.50. Η καλύτερη τιμή FBI 0.96 σε αυτή την περίπτωση εμφανίζεται για την κωδικοποίηση mp01.

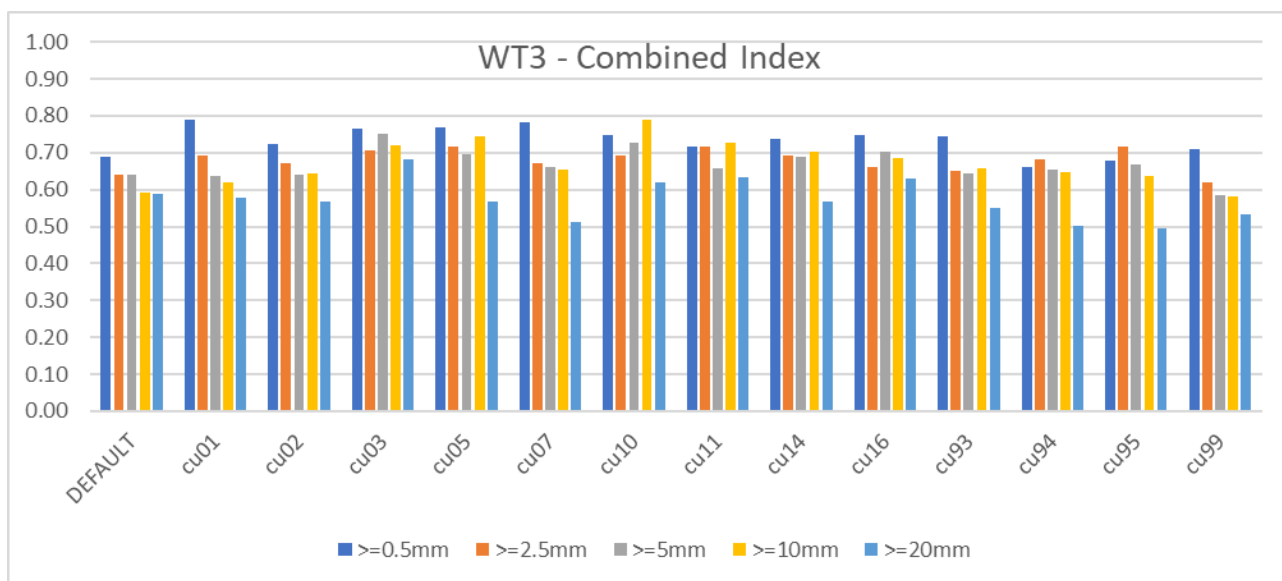


Σχήμα 3.45. Όπως στο Σχήμα 3.44, αλλά και για άλλες 11 φυσικές παραμετροποιήσεις μικροφυσικής με κωδικοποίηση mp01 έως mp13 (βλέπε Πίνακα 2.9).



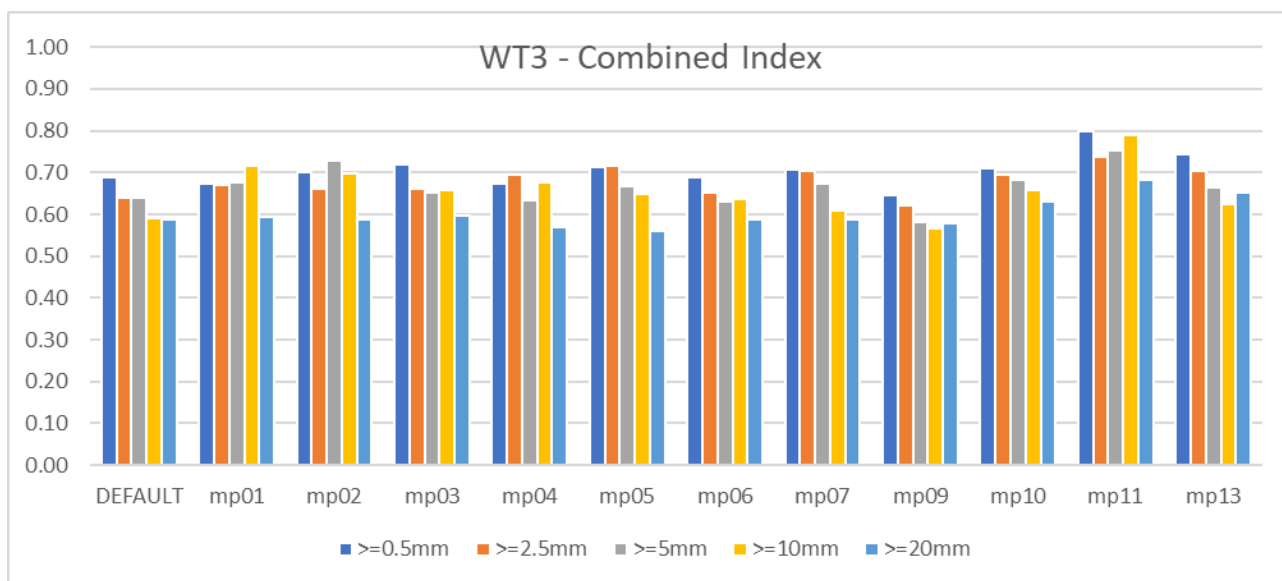
Σχήμα 3.46. Όπως στο Σχήμα 3.44, αλλά και για άλλες 11 φυσικές παραμετροποιήσεις μικροφυσικής με κωδικοποίηση mp14 έως mp52 (βλέπε Πίνακα 2.9).

Από την εξέταση των αποτελεσμάτων του $\Sigma\Delta$, για τις παραμετροποιήσεις ανωμεταφοράς (Σχήμα 3.47), μπορούν να προκύψουν συμπεράσματα όσον αφορά τη γενική επιτυχία πρόγνωσης υετού από το μοντέλο ($\Sigma\Delta=1$ βέλτιστη ικανότητα πρόγνωσης) για κάθε παραμετροποίηση ανωμεταφοράς ανάλογα το κατώφλι υετού. Πιο συγκεκριμένα, στο κατώφλι $\geq 0.5\text{mm}$ η πλειονότητα των παραμετροποιήσεων που δοκιμάστηκαν έδωσαν υψηλότερες τιμές του $\Sigma\Delta$ από αυτές των προεπιλεγμένων φυσικών παραμετροποιήσεων, με τις υψηλότερες τιμές να παρατηρούνται για τις παραμετροποιήσεις cu01 και cu07 με αντίστοιχες τιμές $\Sigma\Delta$ 0.79 και 0.78, και τις μικρότερες τιμές να εμφανίζονται για την παραμετροποίηση cu94 με τιμή $\Sigma\Delta$ 0.66. Στο κατώφλι $\geq 2.5\text{mm}$, όπως και στο προηγούμενο κατώφλι, η πλειονότητα των παραμετροποιήσεων που δοκιμάστηκαν έδωσαν υψηλότερες τιμές του $\Sigma\Delta$ από αυτές των προεπιλεγμένων φυσικών παραμετροποιήσεων, με τις μεγαλύτερες τιμές να παρατηρούνται για τις παραμετροποιήσεις cu05 και cu11 με ίδια τιμή $\Sigma\Delta$ 0.72, και τις μικρότερες τιμές να παρατηρούνται για την παραμετροποίηση cu99 με τιμή $\Sigma\Delta$ 0.62. Στο κατώφλι $\geq 5.0\text{mm}$, σχεδόν όλες οι παραμετροποιήσεις που δοκιμάστηκαν έδωσαν ίδιες ή υψηλότερες τιμές του $\Sigma\Delta$ από αυτές των προεπιλεγμένων φυσικών παραμετροποιήσεων, με τις μεγαλύτερες τιμές να παρατηρούνται για τις παραμετροποιήσεις cu03 και cu10 με τιμές $\Sigma\Delta$ 0.75 και 0.73 αντίστοιχα, και τις μικρότερες τιμές να παρατηρούνται, όπως και προηγουμένως, για την παραμετροποίηση cu99 με τιμή $\Sigma\Delta$ 0.58. Στο κατώφλι $\geq 10.0\text{mm}$, όπως και στα προηγούμενα κατώφλια, σχεδόν όλες οι παραμετροποιήσεις που δοκιμάστηκαν έδωσαν υψηλότερες τιμές του $\Sigma\Delta$ από αυτές των προεπιλεγμένων φυσικών παραμετροποιήσεων, με τις μεγαλύτερες τιμές να παρατηρούνται για την παραμετροποίηση cu10 με τιμή $\Sigma\Delta$ 0.79, και τις μικρότερες τιμές να εμφανίζονται, όπως και προηγουμένως, για την παραμετροποίηση cu99 με τιμή $\Sigma\Delta$ 0.58. Τέλος, στο κατώφλι $\geq 20.0\text{mm}$, οι περισσότερες παραμετροποιήσεις που δοκιμάστηκαν έδωσαν χαμηλότερες τιμές του $\Sigma\Delta$ από αυτές των προεπιλεγμένων φυσικών παραμετροποιήσεων. Οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται για τις παραμετροποιήσεις cu03, cu11 και cu16 με τιμές $\Sigma\Delta$ 0.68, 0.63 και 0.63 αντίστοιχα, και τις μικρότερες τιμές να εμφανίζονται για την παραμετροποίηση cu95 με τιμή $\Sigma\Delta$ 0.49. Από τα αποτελέσματα και τη γενική εποπτική εικόνα του $\Sigma\Delta$ φαίνεται ότι οι καλύτερες παραμετροποιήσεις ανωμεταφοράς είναι οι cu03 και cu10, με τη cu03 να υπερτερεί κυρίως στα μεγαλύτερα ύψη υετού.

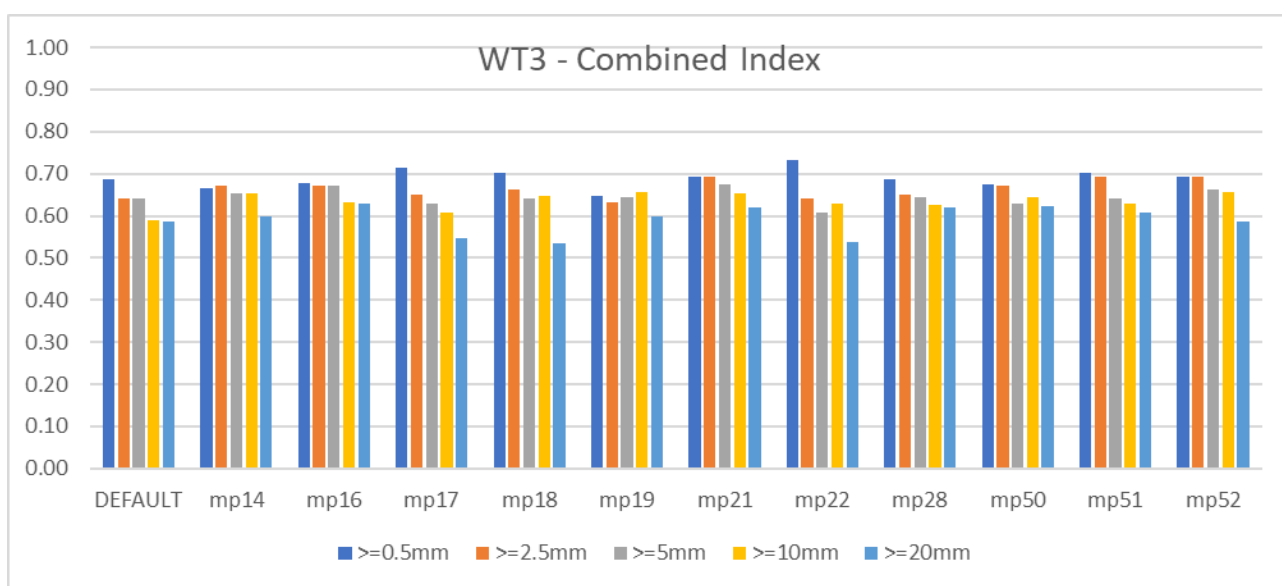


Σχήμα 3.47. Γραφική απεικόνιση του ΣΔ για την πρώτη ($t+12\text{h}$ έως $t+36\text{h}$) ημέρα πρόγνωσης για τον WT3 για πέντε κατώφλια υετού, για τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις (Default) και για άλλες 13 παραμετροποιήσεις ανωμεταφοράς με κωδικοποίηση cu01 έως cu99 (βλέπε Πίνακα 2.8).

Από την εξέταση των αποτελεσμάτων του ΣΔ για τις παραμετροποιήσεις μικροφυσικής (Σχήματα 3.48 και 3.49) προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα ανάλογα το κατώφλι υετού. Στο κατώφλι $\geq 0.5\text{mm}$, τα καλύτερα αποτελέσματα ικανότητας πρόγνωσης υετού από το μοντέλο παρατηρούνται στις παραμετροποιήσεις mp11 και mp13 με αντίστοιχες τιμές ΣΔ 0.80 και 0.74. Στο κατώφλι $\geq 2.5\text{mm}$, σχεδόν όλες οι παραμετροποιήσεις που δοκιμάστηκαν έδωσαν ίδιες ή υψηλότερες τιμές του ΣΔ από αυτές των προεπιλεγμένων φυσικών παραμετροποιήσεων, με τις μεγαλύτερες τιμές να παρατηρούνται για την παραμετροποίηση mp11 με τιμή ΣΔ 0.80, ενώ για την παραμετροποίηση mp09 εμφανίζονται οι μικρότερες τιμές με ΣΔ 0.62. Στο κατώφλι $\geq 5.0\text{mm}$, οι υψηλότερες τιμές του ΣΔ παρατηρούνται για τις παραμετροποιήσεις mp11 (όπως και σε προηγούμενα κατώφλια) και mp02 με αντίστοιχες τιμές ΣΔ 0.75 και 0.73, και οι μικρότερες τιμές εμφανίζονται για την παραμετροποίηση mp09, όπως και στο προηγούμενο κατώφλι, με τιμή ΣΔ 0.58. Στο κατώφλι $\geq 10.0\text{mm}$, σχεδόν όλες οι παραμετροποιήσεις που δοκιμάστηκαν έδωσαν καλύτερες τιμές του ΣΔ από αυτές των προεπιλεγμένων φυσικών παραμετροποιήσεων, με τις μεγαλύτερες τιμές να παρατηρούνται για ακόμη μια φορά για την παραμετροποίηση mp11 με τιμή ΣΔ 0.79, ενώ η μικρότερη τιμή ΣΔ 0.56 παρατηρείται ξανά για την κωδικοποίηση mp09. Στο κατώφλι $\geq 20.0\text{mm}$, παρατηρούνται γενικά οι μικρότερες τιμές του ΣΔ ανάμεσα στα κατώφλια για όλες σχεδόν τις παραμετροποιήσεις, γεγονός που αποδεικνύει τη μεγαλύτερη δυσκολία της ικανότητας πρόγνωσης υετού του μοντέλου στα μεγάλα ύψη υετού. Σε αυτή την περίπτωση τα καλύτερα αποτελέσματα παρατηρούνται για τις παραμετροποιήσεις mp11 και mp13 με αντίστοιχες τιμές ΣΔ 0.68 και 0.65, ενώ τα χειρότερα αποτελέσματα για τις παραμετροποιήσεις mp18 και mp22 με τιμή ΣΔ 0.54. Από τα αποτελέσματα του ΣΔ φαίνεται ότι η καλύτερη παραμετροποίηση μικροφυσικής είναι η mp11, αφού υπερτερεί έναντι των άλλων σε όλα τα κατώφλια υετού.



Σχήμα 3.48. Όπως στο Σχήμα 3.47, αλλά και για άλλες 11 φυσικές παραμετροποιήσεις μικροφυσικής με κωδικοποίηση mp01 έως mp13 (βλέπε Πίνακα 2.9).

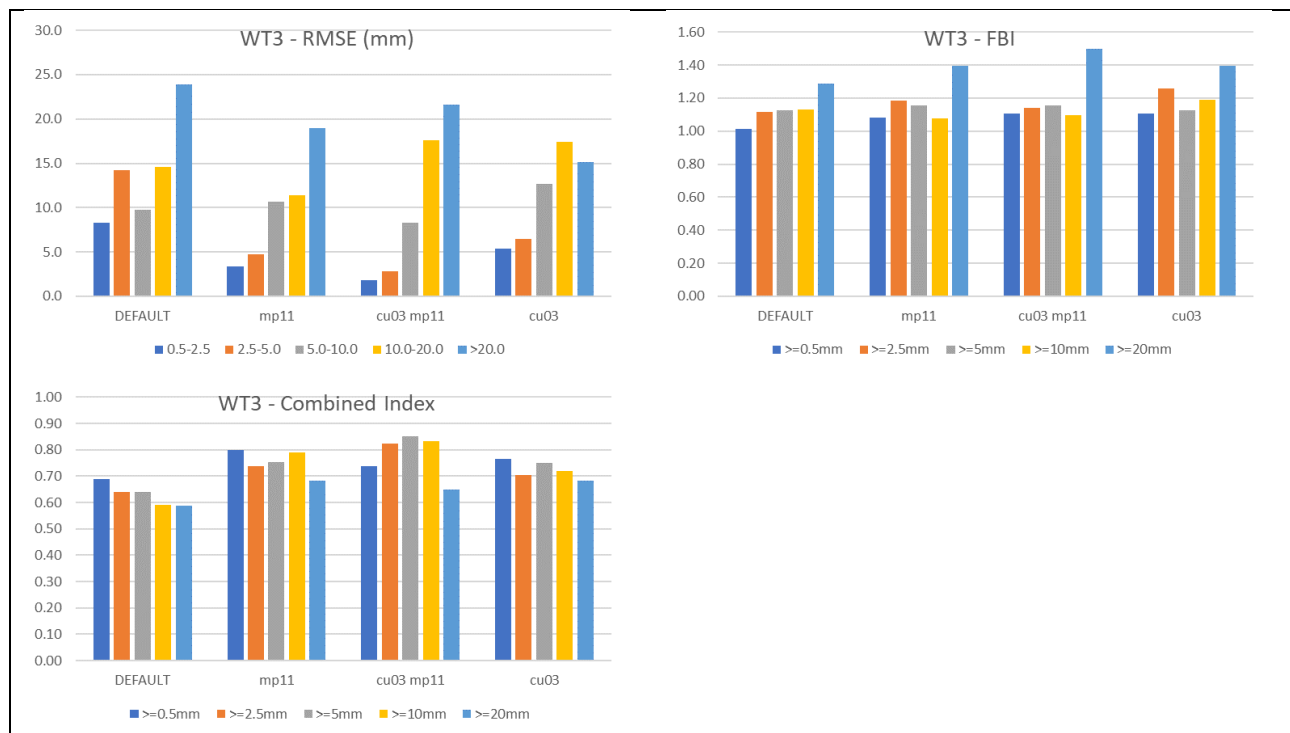


Σχήμα 3.49. Όπως στο Σχήμα 3.47, αλλά και για άλλες 11 φυσικές παραμετροποιήσεις μικροφυσικής με κωδικοποίηση mp14 έως mp52 (βλέπε Πίνακα 2.9).

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τον ΣΔ, γίνεται μια τελική έρευνα ελέγχου για τις 6 πλησιέστερες ημέρες στο κέντρο της συστάδας του WT3, όπως και προηγουμένως. Η εκτέλεση του μοντέλου WRF αυτή τη φορά γίνεται για τον συνδυασμό παραμετροποιήσεων ανωμεταφοράς και μικροφυσικής που εμφάνισε τα καλύτερα αποτελέσματα. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον συνδυασμό των παραμετροποιήσεων ανωμεταφοράς και μικροφυσικής συγκρίνονται με αυτά που προέκυψαν από την αλλαγή των συγκεκριμένων παραμετροποιήσεων μεμονωμένα. Η νέα παραμετροποίηση συνδυάζει την παραμετροποίηση ανωμεταφοράς cu03 και μικροφυσικής mp11 και αναφέρεται ως cu03 mp11. Στο Σχήμα 3.50 παρουσιάζονται τα

αποτελέσματα του RMSE, του δείκτη FBI και του ΣΔ για την πρώτη (t+12h έως t+36h) ημέρα πρόγνωσης για τον WT3 για πέντε εύρη ή κατώφλια υετού για την παραμετροποίηση cu03 mp11.

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα του συνδυασμού παραμετροποιήσεων cu03 mp11 (Σχήμα 3.50) προκύπτουν τα εξής: Η παραμετροποίηση cu03 mp11 παρουσιάζει μικρότερα σφάλματα υετού στα μικρότερα εύρη, α) $\geq 0.5\text{mm}$ $P < 2.5\text{mm}$ και β) $\geq 2.5\text{mm}$ $P < 5.0\text{mm}$, σε σχέση με τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις αλλά και τις αλλαγές αυτών μεμονωμένα, όμως τα σφάλματα αυξάνονται αρκετά στα εύρη υετού α) $\geq 10.0\text{mm}$ $P < 20.0\text{mm}$ και β) $P \geq 20.0\text{mm}$, έτσι ώστε να μην υπερτερεί ο συνδυασμός αυτός σε σχέση με τις περιπτώσεις μεμονωμένων αλλαγών των παραμετροποιήσεων. Επίσης, από τα αποτελέσματα του δείκτη FBI προκύπτει ότι στις μικρότερες κλάσεις υετού τα αποτελέσματα είναι σχεδόν ίδια μεταξύ των παραμετροποιήσεων με μικρή υπερεκτίμηση υετού, ενώ στο κατώφλι $\geq 20.0\text{mm}$ η παραμετροποίηση cu03 mp11 εμφανίζει μεγαλύτερη υπερεκτίμηση υετού από τις άλλες. Ακόμη, όσον αφορά την εξέταση των τιμών ΣΔ, η παραμετροποίηση cu03 mp11 εμφανίζει καλύτερη ικανότητα πρόγνωσης υετού στα κατώφλια $\geq 2.5\text{mm}$, $\geq 5.0\text{mm}$ και $\geq 10.0\text{mm}$, από ότι οι παραμετροποιήσεις mp11 και cu03, όχι όμως και στο κατώφλι $\geq 20.0\text{mm}$, όπως αναμενόταν, για το οποίο παρουσιάζει μικρότερες τιμές από τις παραμετροποιήσεις cu03 και mp11 μεμονωμένα. Αυτή η δοκιμή συνδυασμού παραμετροποιήσεων, επισημαίνει τη δυσκολία που προκύπτει γενικά στην πρόγνωση του υετού από το μοντέλο και ότι παραμετροποιήσεις σε συγκεκριμένες φυσικές διεργασίες που δίνουν καλά αποτελέσματα μεμονωμένα δεν είναι απαραίτητο ότι αν συνδυαστούν θα δώσουν εξίσου καλά ή και καλύτερα αποτελέσματα.



Σχήμα 3.50. Γραφική απεικόνιση του RMSE (mm), του δείκτη FBI και του ΣΔ για την πρώτη (t+12h έως t+36h) ημέρα πρόγνωσης, για τον WT3, για πέντε εύρη ή κατώφλια υετού, για τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις (Default) και για τις παραμετροποιήσεις cu03, mp11 και cu03 mp11.

Κεφάλαιο 4

Συμπεράσματα

Κύριος σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτελεί η μελέτη της εξάρτησης του βαθμού προγνωσιμότητας των μετεωρολογικών παραμέτρων της θερμοκρασίας και του υετού από τον τύπο καιρού, για την περιοχή της ΒΔ Ελλάδας, με τη χρήση του μοντέλου WRF, και η έρευνα βελτίωσης των αποτελεσμάτων επαλήθευσης που προκύπτουν από το προηγούμενο βήμα. Η έρευνα και τα αποτελέσματα της διδακτορικής διατριβής αφορούν μια χρονική περίοδο 10 ετών (01/01/2009 – 31/12/2018).

► Για τον προσδιορισμό των τύπων καιρού (WTs) που επικρατούν στην περιοχή της ΒΔ Ελλάδας χρησιμοποιούνται μετεωρολογικά δεδομένα ERA5 τόσο για την περιοχή της ΒΔ Ελλάδας όσο και για την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, πάνω στα οποία εφαρμόζονται συνδυαστικά οι μέθοδοι της Παραγοντικής Ανάλυσης (FA) και της Ανάλυσης κατά Συστάδες (k-means CA). Αρχικά εφαρμόζεται η FA σε ένα σύνολο 19719 χρονοσειρών μετεωρολογικών δεδομένων, ξεχωριστά όμως για κάθε μετεωρολογική παράμετρο, με σκοπό τη μείωση του πλήθους των χρονοσειρών και προκύπτουν 47 ασυσχέτιστες μεταβλητές (παράγοντες). Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η k-means CA στους 47 παράγοντες με αποτέλεσμα τη δημιουργία 10 τελικών συστάδων δηλαδή τύπων καιρού (WTs), χρησιμοποιώντας το κριτήριο του «άλματος» και τη φυσική υπόσταση των αποτελεσμάτων. Για τους 10 WTs που ορίζονται υπολογίζονται οι μέσοι χάρτες για όλες τις μετεωρολογικές παραμέτρους και τις χρονικές στιγμές των ημερών αναφοράς. Τα χαρακτηριστικά των WTs αναφέρονται παρακάτω:

WT1: Είναι WT της ψυχρής περιόδου, με μέγιστο συχνότητας τον Ιανουάριο. Χαρακτηρίζεται από βαρομετρικό χαμηλό στη Γένοβα, προκαλώντας θερμή μεταφορά στη Δυτική Ελλάδα και νότιους ανέμους στο Ιόνιο. Νεφώσεις εμφανίζονται κυρίως το βράδυ στη ΒΔ Ελλάδα.

WT2: Αντιπροσωπεύει τις μεταβατικές εποχές με μέγιστο εμφάνισης την άνοιξη (Απρίλιο και Μάιο). Χαρακτηρίζεται από αντικυκλωνική κυκλοφορία και ελαφριές νεφώσεις κυρίως στα ορεινά της Πίνδου. Οι άνεμοι είναι γενικά ασθενείς και μεταβλητοί.

WT3: Είναι τύπος της ψυχρής περιόδου, με μέγιστο εμφάνισης τον Φεβρουάριο. Ένα χαμηλό στην κεντρική Μεσόγειο προκαλεί κακοκαιρία και εκτεταμένες νεφώσεις στη ΒΔ Ελλάδα, με νοτιοδυτικούς ανέμους στο Ιόνιο που μετατρέπονται σε δυτικούς τις βραδινές ώρες.

WT4: Παρουσιάζει ψυχρές συνθήκες κατά τους χειμερινούς μήνες, με μέγιστο εμφάνισης τον Δεκέμβριο και Ιανουάριο. Χαρακτηρίζεται από βαρομετρικό χαμηλό στα Δωδεκάνησα το οποίο προκαλεί ισχυρούς βόρειους ανέμους και πολύ χαμηλές θερμοκρασίες στα ορεινά.

WT5: Ο λιγότερο συχνός WT, εμφανίζεται κυρίως τον Ιούνιο. Συνδέεται με χαμηλές πιέσεις στην περιοχή της Κύπρου και ήπιες καιρικές συνθήκες στην Ήπειρο και τη δυτική Μακεδονία, με μεγάλη ατμοσφαιρική αστάθεια, ευνοώντας την ανάπτυξη καταιγίδων τις μεσημβρινές ώρες.

WT6: Εμφανίζεται κατά την ψυχρή περίοδο με μέγιστο τον Φεβρουάριο. Ένα χαμηλό στη Σικελία προκαλεί ανατολικούς ανέμους στην Ήπειρο και υψηλά ποσοστά νέφωσης σε ολόκληρη την περιοχή.

WT7: Αποτελεί τύπο της θερμής περιόδου, με μέγιστο εμφάνισης τον Ιούνιο. Χαρακτηρίζεται από υψηλή αστάθεια και νεφώσεις τις μεσημβρινές ώρες στα ηπειρωτικά της ΒΔ Ελλάδας.

WT8: Εμφανίζεται κατά την ψυχρή περίοδο, με μέγιστο εμφάνισης τον Φεβρουάριο. Χαρακτηρίζεται από ισχυρούς δυτικούς ανέμους και υψηλά ποσοστά νεφοκάλυψης, κυρίως στα ορεινά της ΒΔ Ελλάδας.

WT9: Είναι ο συχνότερος τύπος της ψυχρής περιόδου, εμφανιζόμενος κυρίως από τον Οκτώβριο έως τον Μάρτιο. Χαρακτηρίζεται από αντικυκλωνική κυκλοφορία που προκαλεί ψυχρή μεταφορά και βόρειους ανέμους. Παρουσιάζει τις χαμηλότερες θερμοκρασίες τις πρωινές ώρες.

WT10: Είναι ο πιο συχνός τύπος καιρού, εμφανιζόμενος κατά τη θερμή περίοδο με μέγιστο εμφάνισης τον Αύγουστο. Χαρακτηρίζεται από την τυπική θερινή κυκλοφορία με ελάχιστες νεφώσεις και υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, χαρακτηρίζεται από την επικράτηση της θαλάσσιας και απογείου αύρας.

Συμπερασματικά, οι διαφορετικοί WTs αντανakλούν τις εποχικές αλλαγές στο κλίμα της ΒΔ Ελλάδας, υπογραμμίζοντας την πολυπλοκότητα και την ποικιλία των καιρικών φαινομένων που επικρατούν στην περιοχή.

► Η αξιολόγηση των προγνωστικών τιμών θερμοκρασίας αέρα στα 2 μέτρα στις 04 UTC και 12 UTC, για την πρώτη και δεύτερη ημέρα πρόγνωσης από το μοντέλο, γίνεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Cressman και τις προεπιλεγμένες φυσικές παραμετροποιήσεις του μοντέλου WRF. Για την ορθή σύγκριση πρόγνωσης – παρατήρησης, εφαρμόζεται η διόρθωση θερμοκρασίας σε κάθε σταθμό, βάση της διαφοράς μεταξύ του σταθμισμένου υψομέτρου του μοντέλου και του πραγματικού υψομέτρου του σταθμού, χρησιμοποιώντας την τυπική εμπειρική θερμοβαθμίδα των 6.5K/km. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι τιμές ME και των τυπικών αποκλίσεων αυτών για 64 ζεύγη τιμών, για κάθε WT και για 11 μετεωρολογικούς σταθμούς.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα αξιολόγησης θερμοκρασίας, τα μεγαλύτερα σφάλματα παρατηρούνται για τους WT9, WT10, WT5, WT2, WT1 και WT7 με φθίνουσα σειρά σφαλμάτων, ενώ οι μετεωρολογικοί σταθμοί του Καρπενησίου, της Βοβούσας και των Ιωαννίνων καταγράφουν τα υψηλότερα σφάλματα. Το μοντέλο υπερεκτιμά σημαντικά τη θερμοκρασία αέρα στα 2 μέτρα στις 04 UTC για τους συγκεκριμένους WTs και κυρίως για τους αναφερόμενους σταθμούς. Κοινό χαρακτηριστικό των αναφερόμενων WTs είναι οι πολύ μικρές τιμές ταχύτητας ανέμου σε επίπεδα άπνοιας στις 06 UTC. Στους WT9, WT10 και WT5, όπου εμφανίζονται και τα μεγαλύτερα σφάλματα, εμφανίζονται ιδιαίτερα χαμηλές τιμές νεφοκάλυψης στις 00 UTC και 06 UTC (βλέπε Παράρτημα Α). Επίσης δεν παρατηρούνται αξιοσημείωτες διαφορές στα αποτελέσματα θερμοκρασίας μεταξύ της πρόγνωσης πρώτης και δεύτερης ημέρας. Συνολικά, φαίνεται πως το μοντέλο WRF αποτυγχάνει να προβλέψει σωστά τις πρωινές θερμικές αναστροφές ή/και γεγονότα ομίχλης τις πρωινές ώρες. Αντίθετα, οι WTs που εμφάνισαν χαμηλά σφάλματα στη θερμοκρασία αέρα σχετίζονται με νεφελώδεις συνθήκες που σχετίζονται με κυκλωνική δραστηριότητα ή/και υψηλές ταχύτητες ανέμου στην επιφάνεια.

► Για την αξιολόγηση των προγνωστικών τιμών υετού από το μοντέλο WRF, μελετώνται οι αθροιστικές τιμές υετού 24ώρου για την πρώτη (t+12h έως t+36h) και δεύτερη (t+36h έως t+60h) ημέρα πρόγνωσης, για το σύνολο των μετεωρολογικών σταθμών και για τους WTs που εμφανίζουν αξιοσημείωτο αριθμό ημερήσιων περιστατικών υετού. Για τη σύγκριση των προγνωστικών τιμών με τις παρατηρήσεις των μετεωρολογικών σταθμών λαμβάνονται υπόψη τα εννέα πλησιέστερα σε αυτόν πλεγματικά σημεία του μοντέλου, θεωρώντας την πλησιέστερη τιμή στην παρατήρηση ως τιμή

πρόγνωσης του μοντέλου. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι στατιστικές συναρτήσεις σφαλμάτων, για πέντε εύρη τιμών υετού, όπως επίσης και οι συναρτήσεις επίδοσης, οι οποίες υπολογίζονται για πέντε κατώφλια τιμών υετού και δίνουν πληροφορίες σχετικά με την ικανότητα πρόγνωσης του μοντέλου ως προς τα συμβάντα υετού. Ακόμη εισάγεται ένας νέος δείκτης (Συνδυαστικός Δείκτης, ΣΔ) ο οποίος βασίζεται στις συναρτήσεις επίδοσης PC, POD, FAR, CSI και GSS με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της συνολικής απόδοσης του μοντέλου, έτσι ώστε να αξιολογηθεί συνολικά η ικανότητα πρόγνωσης για κάθε WT.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα για την ικανότητα πρόγνωσης υετού του μοντέλου, παρατηρείται ότι το μοντέλο αποδίδει καλύτερα στους WT3 και WT8 όπου κυριαρχούν νοτιοδυτικοί άνεμοι, ενώ το μοντέλο παρουσιάζει αδυναμίες στον WT4, όπου κυριαρχούν βορειοανατολικοί άνεμοι. Γενικά φαίνεται ότι η προγνωστική ακρίβεια του μοντέλου είναι μεγαλύτερη στις περιπτώσεις όπου οι βροχοπτώσεις σχετίζονται με παρουσία βαρομετρικών χαμηλών σε συνδυασμό με την ορεογραφική επίδραση της οροσειράς της Πίνδου, ενώ η ικανότητα πρόγνωσης μειώνεται στις περιπτώσεις που επικρατεί ροή ανέμου βορείων / βορειοανατολικών διευθύνσεων και οι βροχοπτώσεις οφείλονται σε ατμοσφαιρικές διαταραχές της ανώτερης ατμόσφαιρας που προκαλούν υψηλή στατική αστάθεια. Για τους WTs της θερμής περιόδου, τα συμβάντα υετού παρατηρούνται κυρίως, αν όχι αποκλειστικά, στους ηπειρωτικούς μετεωρολογικούς σταθμούς, και παρατηρείται υπερεκτίμηση του υετού από το μοντέλο στα χαμηλότερα κατώφλια υετού, ενώ στα υψηλότερα κατώφλια παρατηρείται σημαντική υποεκτίμηση.

► Για τη μελέτη βελτίωσης των αποτελεσμάτων πρόγνωσης της θερμοκρασίας ακολουθείται η ίδια διαδικασία που εφαρμόζεται στην αξιολόγηση των προγνώσεων θερμοκρασίας. Στην περίπτωση αυτή όμως, το μοντέλο WRF εκτελείται για τους WTs που εμφάνισαν τα μεγαλύτερα σφάλματα (WT1, WT2, WT5, WT7, WT9 και WT10), για τις 6 πλησιέστερες ημέρες στο κέντρο κάθε συστάδας. Η εκτέλεση του μοντέλου πραγματοποιείται με την εφαρμογή κάθε φορά, μιας από τις έξι διαφορετικές παραμετροποιήσεις φυσικών διεργασιών, για απόκτηση δεδομένων πρόγνωσης της πρώτης ημέρας. Ακολούθως, υπολογίζεται το ME και η τυπική απόκλιση αυτού για τα ζεύγη τιμών σε κάθε μετεωρολογικό σταθμό και κάθε αναφερόμενο WT.

Από τα αποτελέσματα της μελέτης βελτίωσης των τιμών θερμοκρασίας προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για κάθε WT. Στον WT1, οι μετεωρολογικοί σταθμοί που είχαν εμφανίσει καλές προγνώσεις θερμοκρασίας με τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις, όπως οι Ασπράγγελοι, τα Τρίκαλα και το Τρίστενο, εμφάνισαν χειρότερες επιδόσεις με άλλες παραμετροποιήσεις, κυρίως στις θερμοκρασίες στις 04 UTC. Η παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 παρουσίασε καλές επιδόσεις στο Καρπενήσι και τα Ιωάννινα. Στον WT2 η παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 έδωσε καλά αποτελέσματα για αρκετούς σταθμούς, όπως οι Ασπράγγελοι, η Φλώρινα, τα Γρεβενά, τα Ιωάννινα, το Καρπενήσι, η Βεγορίτιδα και η Βοβούσα, αλλά παρουσίασε αποκλίσεις σε άλλους σταθμούς, όπως το Αιτωλικό και το Τρίστενο. Στον WT5 η παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 έδωσε γενικά καλά αποτελέσματα πρόγνωσης θερμοκρασιών, βελτιώνοντας τις αρχικές τιμές των προεπιλεγμένων παραμετροποιήσεων για αρκετούς σταθμούς. Στον WT7 η παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 αποδείχθηκε ξανά η πιο επιτυχημένη στις περισσότερες περιπτώσεις, όπως και στους προηγούμενους WTs. Στον WT9 η παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 ήταν η καλύτερη επιλογή για αρκετούς σταθμούς, ειδικά στις προγνώσεις θερμοκρασίας στις 04 UTC, παρουσιάζοντας σημαντική βελτίωση σε σχέση με τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις. Στον WT10 η pbl3 sfclay3 παραμένει η καλύτερη επιλογή για τις προγνώσεις θερμοκρασίας, κυρίως στις 04 UTC, αν και σε κάποιους σταθμούς, όπως το Τρίστενο και η Βεγορίτιδα, παρατηρήθηκε υποεκτίμηση των θερμοκρασιών. Φαίνεται ότι η παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 αναδεικνύεται ως η πιο αξιόπιστη επιλογή για τις προγνώσεις θερμοκρασίας στις

περισσότερες περιπτώσεις και για διαφορετικούς WTs, βελτιώνοντας σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα σε σύγκριση με τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις του μοντέλου, ιδιαίτερα σε συγκεκριμένους σταθμούς. Ωστόσο, παρατηρούνται αρκετές αποκλίσεις σε συγκεκριμένους μετεωρολογικούς σταθμούς και WTs, γεγονός που υποδηλώνει ότι η απόδοση της παραμετροποίησης pbl3 sfclay3, αλλά και των υπόλοιπων που δοκιμάστηκαν, δεν είναι ομοιόμορφη σε όλες τις περιοχές. Να σημειωθεί ότι η περιοχή της βορειοδυτικής Ελλάδας χαρακτηρίζεται από πολύπλοκο έδαφος και φαίνεται ότι υπάρχει δυσκολία στην ακριβή πρόγνωση θερμοκρασίας σε όλα τα σημεία της περιοχής εξίσου, με τη χρήση συγκεκριμένων φυσικών παραμετροποιήσεων. Συνολικά, η παραμετροποίηση pbl3 sfclay3 (συνδυασμός των σχημάτων ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και επιφανειακού στρώματος αέρος, Hybrid EDMF GFS και NCEP Global Forecast System αντίστοιχα) παρουσιάζει σταθερή βελτίωση σε σχέση με την προεπιλεγμένη, αλλά η επιλογή της καλύτερης παραμετροποίησης εξαρτάται συχνά από τις τοπικές γεωμορφολογικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του κάθε σταθμού.

► Για τη μελέτη βελτίωσης των αποτελεσμάτων πρόγνωσης του υετού, ακολουθείται η ίδια διαδικασία που εφαρμόζεται στην αξιολόγηση των προγνώσεων υετού. Στην περίπτωση αυτή όμως, το μοντέλο WRF εκτελείται για τις 6 πλησιέστερες ημέρες στο κέντρο του WT3, για απόκτηση δεδομένων πρόγνωσης υετού (P) 24ωρών της πρώτης ημέρας και εφαρμόζοντας κάθε φορά μια από ένα σύνολο διαφορετικών παραμετροποιήσεων φυσικών διεργασιών που αφορούν τη μικροφυσική και την ανωμεταφορά. Ακολουθώντας, υπολογίζονται οι στατιστικές συναρτήσεις που βασίζονται σε πέντε κατηγορίες ημερήσιων προγνωστικών τιμών υετού και οι συναρτήσεις επίδοσης που βασίζονται στους υπολογισμούς πινάκων συνάφειας χρησιμοποιώντας πέντε κατώφλια ημερήσιων τιμών υετού.

Από την εξέταση των αποτελεσμάτων της συνάρτησης σφαλμάτων RMSE, για τον WT3 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα: Για τις παραμετροποιήσεις ανωμεταφοράς που δοκιμάστηκαν, οι παραμετροποιήσεις cu94, cu93, και cu95 εμφανίζουν τα καλύτερα αποτελέσματα, για μικρές ποσότητες υετού ($\geq 0.5\text{mm}$ P < 2.5mm), με τις προεπιλεγμένες παραμετροποιήσεις να παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα σφάλματα. Η παραμετροποίηση cu93 διακρίνεται για τα μικρότερα σφάλματα και στις μεσαίες ποσότητες υετού ($\geq 2.5\text{mm}$ P < 5.0mm και $\geq 5.0\text{mm}$ P < 10.0mm), ενώ για τις μεγαλύτερες ποσότητες υετού ($\geq 10.0\text{mm}$ P < 20.0mm και P $\geq 20.0\text{mm}$) οι παραμετροποιήσεις cu03 και cu02 αποδίδουν τα καλύτερα αποτελέσματα. Για τις παραμετροποιήσεις μικροφυσικής που δοκιμάστηκαν, οι παραμετροποιήσεις mr01 και mr11 αποδίδουν τα καλύτερα αποτελέσματα για μικρές και μεσαίες ποσότητες υετού ($\geq 0.5\text{mm}$ P < 2.5mm , και $\geq 2.5\text{mm}$ P < 5.0mm), ενώ η παραμετροποίηση mr13 αποδίδει καλύτερα σε σχέση με άλλες για μεγάλες ποσότητες υετού ($\geq 10.0\text{mm}$ P < 20.0mm και P $\geq 20.0\text{mm}$).

Επίσης από την εξέταση των αποτελεσμάτων του ΣΔ, ο οποίος κρίνει την ικανότητα πρόγνωσης υετού του μοντέλου προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα: Για τις παραμετροποιήσεις ανωμεταφοράς που δοκιμάστηκαν, οι παραμετροποιήσεις cu01 και cu07 είναι οι καλύτερες επιλογές στο κατώφλι $\geq 0.5\text{mm}$, ενώ οι παραμετροποιήσεις cu05 και cu11 ξεχωρίζουν στο κατώφλι $\geq 2.5\text{mm}$. Στο κατώφλι $\geq 5.0\text{mm}$, οι παραμετροποιήσεις cu03 και cu10, δείχνουν τη μεγαλύτερη ακρίβεια στις προγνώσεις, ενώ στα κατώφλια $\geq 10.0\text{mm}$ και $\geq 20.0\text{mm}$ οι παραμετροποιήσεις cu10 και cu03 αντίστοιχα δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης. Συνολικά, από τα αποτελέσματα και τη συνολική εικόνα του ΣΔ, προκύπτει ότι οι πιο αποτελεσματικές παραμετροποιήσεις ανωμεταφοράς είναι οι cu03 και cu10, με τη cu03 (σχήμα Grell-Freitas ensemble) να παρουσιάζει ιδιαίτερα καλή απόδοση σε μεγάλα ύψη υετού. Για τις παραμετροποιήσεις μικροφυσικής που εξετάστηκαν, τα

καλύτερα αποτελέσματα εμφανίζονται για την παραμετροποίηση μικροφυσικής mp11 (σχήμα CAM 5.1 microphysics), αφού υπερτερεί έναντι των άλλων σε όλα τα κατώφλια υετού.

Επίσης, πραγματοποιήθηκε έλεγχος και για μια νέα παραμετροποίηση, που συνδυάζει τις καλύτερες παραμετροποιήσεις ανωμεταφοράς και μικροφυσικής, από τα αποτελέσματα του ΣΔ που αναφέρεται ως cu03 mp11. Αυτή η δοκιμή συνδυασμού παραμετροποιήσεων αναδεικνύει τη γενική δυσκολία στην πρόγνωση του υετού από το μοντέλο και δείχνει ότι παραμετροποιήσεις φυσικών διεργασιών που μπορεί να αποδίδουν καλά μεμονωμένα δεν εγγυώνται απαραίτητα εξίσου καλά ή καλύτερα αποτελέσματα όταν συνδυάζονται.

Η παρούσα διατριβή μελέτησε εκτεταμένα τα προγνωστικά αποτελέσματα των μετεωρολογικών παραμέτρων θερμοκρασίας και υετού, όπως προκύπτουν από το μετεωρολογικό μοντέλο WRF, για την περιοχή της ΒΔ Ελλάδας. Τα αποτελέσματα της επαλήθευσης του μοντέλου συσχετίστηκαν με τους WTs και αποκαλύφθηκαν αδυναμίες της πρόγνωσης του μοντέλου που σχετίζονται με συγκεκριμένους WTs. Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων πρόγνωσης του μοντέλου που διενεργείται καθημερινά από το Εργαστήριο Μετεωρολογίας του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Επίσης, με την έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε φυσικές παραμετροποιήσεις του μοντέλου, αναδείχθηκαν κατάλληλες παραμετροποιήσεις που ανταποκρίνονται καλά σε συγκεκριμένους WTs και μετεωρολογικούς σταθμούς και συμβάλλουν στη βελτίωση της πρόγνωσης καιρού της περιοχής.

Για την παρούσα διδακτορική διατριβή υπάρχουν αρκετοί πιθανοί μελλοντικοί στόχοι έρευνας που θα μπορούσαν να επεκτείνουν την ήδη διενεργηθείσα μελέτη και να προσφέρουν νέα προγνωστικά εργαλεία και γνώσεις. Αρχικά θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μια διερεύνηση επαλήθευσης και επικύρωσης του μοντέλου πρόγνωσης καιρού που χρησιμοποιήθηκε για τη θερμοκρασία του αέρα στην επιφάνεια, αλλά και καθ' ύψος αρκετών μέτρων, με σταδιακή αύξηση της οριζόντιας και κατακόρυφης ανάλυσης του μοντέλου. Η έρευνα αυτή θα μπορούσε να εστιάσει στους μετεωρολογικούς σταθμούς όπου παρατηρήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις στις μετρήσεις. Στο πλαίσιο αυτό, θα ήταν χρήσιμη η συλλογή επιτόπιων (in-situ) μετεωρολογικών δεδομένων για συγκεκριμένο σταθμό σε ύψος, μέσω εγκατάστασης μετεωρολογικού ιστού με αισθητήρες. Αυτή η μελέτη θα μπορούσε να αποτυπώσει τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες και φυσικές διεργασίες της περιοχής, επισημαίνοντας τη σημασία της υψηλής ανάλυσης και την πιθανή αναγνώριση της βέλτιστης ανάλυσης για το μοντέλο πρόγνωσης.

Επιπλέον, θα μπορούσε να γίνει ανάλυση της προγνωσιμότητας μέσω περιπτωσιολογικών μελετών για συγκεκριμένες κατηγορίες ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως καταιγίδες, ισχυροί άνεμοι και ακραίες θερμοκρασίες (π.χ. παγετοί). Αυτή η ανάλυση θα μπορούσε να διερευνήσει την προγνωσιμότητα των φαινομένων χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο πρόγνωσης καιρού, ενώ στη διαδικασία επαλήθευσης θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν δεδομένα από επίγειους μετεωρολογικούς σταθμούς, δορυφορικές μετρήσεις και μετεωρολογικά ραντάρ.

Τέλος, θα ήταν σημαντική η ενσωμάτωση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης, με στόχο την επιχειρησιακή αναγνώριση των τύπων καιρού που έχουν καθοριστεί στην παρούσα διδακτορική διατριβή. Η χρήση αυτών των τεχνικών θα επιτρέψει την εφαρμογή των βέλτιστων φυσικών παραμετροποιήσεων για κάθε τύπο καιρού, συμβάλλοντας στην ακριβέστερη πρόγνωση καιρού για την περιοχή.

Βιβλιογραφία

- Alpert, P., Neeman, B.U. and Shay-El, Y. (1990) 'Intermonthly Variability of Cyclone Tracks in the Mediterranean', *Journal of Climate*, 3(12), pp. 1474–1478. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1990\)003<1474:IVOCI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1990)003<1474:IVOCI>2.0.CO;2).
- 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(1–2), pp. 3–15. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0032-6>.
- Arakawa, A. and Lamb, V.R. (1977) 'Computational Design of the Basic Dynamical Processes of the UCLA General Circulation Model', in *Methods in Computational Physics: Advances in Research and Applications*. Elsevier, pp. 173–265. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-460817-7.50009-4>.
- Bartzokas, A., Azzopardi, J., Bertotti, L., Buzzi, A., Cavaleri, L., Conte, D., Davolio, S., Dietrich, S., Drago, A., Drofa, O., Gkikas, A., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Lolis, C.J., Michaelides, S., Miglietta, M., Mugnai, A., Music, S., Nikolaides, K., Porcù, F., Savvidou, K. and Tsirogianni, M.I. (2010a) 'The RISKMED project: philosophy, methods and products', *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(7), pp. 1393–1401. Available at: <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1393-2010>.
- Bartzokas, A., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Lolis, C.J., Gkikas, A. and Tsirogianni, M.I. (2010b) 'Weather forecast in north-western Greece: RISKMED warnings and verification of MM5 model', *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(2), pp. 383–394. Available at: <https://doi.org/10.5194/nhess-10-383-2010>.
- Bartzokas, A. and Metaxas, D.A. (1993) 'Covariability and climatic changes of the lower-troposphere temperatures over the Northern Hemisphere', *Il Nuovo Cimento C*, 16(4), pp. 359–373. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF02507647>.
- Bechtold, P., Chaboureaud, J.-P., Beljaars, A., Betts, A.K., Köhler, M., Miller, M. and Redelsperger, J.-L. (2004) 'The simulation of the diurnal cycle of convective precipitation over land in a global model', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 130(604), pp. 3119–3137. Available at: <https://doi.org/10.1256/qj.03.103>.
- Bechtold, P., Köhler, M., Jung, T., Doblas-Reyes, F., Leutbecher, M., Rodwell, M.J., Vitart, F. and Balsamo, G. (2008) 'Advances in simulating atmospheric variability with the ECMWF model: From synoptic to decadal time-scales', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 134(634), pp. 1337–1351. Available at: <https://doi.org/10.1002/qj.289>.
- Bechtold, P., Semane, N., Lopez, P., Chaboureaud, J.-P., Beljaars, A. and Bormann, N. (2014) 'Representing Equilibrium and Nonequilibrium Convection in Large-Scale Models', *Journal of the Atmospheric Sciences*, 71(2), pp. 734–753. Available at: <https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0163.1>.
- Berg, L.K., Gustafson, W.I., Kassianov, E.I. and Deng, L. (2013) 'Evaluation of a Modified Scheme for Shallow Convection: Implementation of CuP and Case Studies', *Monthly Weather Review*, 141(1), pp. 134–147. Available at: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00136.1>.

- Bessagnet, B., Menut, L., Lapere, R., Couvidat, F., Jaffrezo, J.-L., Mailler, S., Favez, O., Pennel, R. and Siour, G. (2020) ‘High Resolution Chemistry Transport Modeling with the On-Line CHIMERE-WRF Model over the French Alps—Analysis of a Feedback of Surface Particulate Matter Concentrations on Mountain Meteorology’, *Atmosphere*, 11(6), p. 565. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos11060565>.
- Boé, J. and Terray, L. (2008) ‘A Weather-Type Approach to Analyzing Winter Precipitation in France: Twentieth-Century Trends and the Role of Anthropogenic Forcing’, *Journal of Climate*, 21(13), pp. 3118–3133. Available at: <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1796.1>.
- Bretherton, C.S. and Park, S. (2009) ‘A New Moist Turbulence Parameterization in the Community Atmosphere Model’, *Journal of Climate*, 22(12), pp. 3422–3448. Available at: <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2556.1>.
- Brown, P.R. (2004) ‘Weather types associated with extreme temperatures in England. Part 1: maximum temperatures’, *Journal of Meteorology*, 29(294), pp. 358–365.
- Brown, P.R. (2005) ‘Weather types associated with extreme temperatures in England. Part 2: minimum temperatures’, *Journal of Meteorology*, 30(295), pp. 23–30.
- Broxton, P.D., Zeng, X., Sulla-Menashe, D. and Troch, P.A. (2014) ‘A Global Land Cover Climatology Using MODIS Data’, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(6), pp. 1593–1605. Available at: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-0270.1>.
- 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(4), pp. 569–585. Available at: [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).
- Colle, B.A., Westrick, K.J. and Mass, C.F. (1999) ‘Evaluation of MM5 and Eta-10 Precipitation Forecasts over the Pacific Northwest during the Cool Season’, *Weather and Forecasting*, 14(2), pp. 137–154. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1999\)014<0137:EOMAEP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1999)014<0137:EOMAEP>2.0.CO;2).
- Cressman, G.P. (1959) ‘AN OPERATIONAL OBJECTIVE ANALYSIS SYSTEM’, *Monthly Weather Review*, 87(10), pp. 367–374. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1959\)087<0367:AOOAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1959)087<0367:AOOAS>2.0.CO;2).
- Dafis, S., Lolis, C.J., Houssos, E.E. and Bartzokas, A. (2016) ‘The atmospheric circulation characteristics favouring snowfall in an area with complex relief in Northwestern Greece’, *International Journal of Climatology*, 36(10), pp. 3561–3577. Available at: <https://doi.org/10.1002/joc.4576>.
- Davis, R.E. and Walker, D.R. (1992) ‘An Upper-Air Synoptic Climatology of the Western United States’, *Journal of Climate*, 5(12), pp. 1449–1467. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1992\)005<1449:AUASCO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1992)005<1449:AUASCO>2.0.CO;2).
- Donaldson, R., Dyer, R.M. and Kraus, M.J. (1975) ‘An objective evaluator of techniques for predicting severe weather events’, in: *Preprints, Ninth Conf. on Severe Local Storms, Norman, OK, Amer. Meteor. Soc.*

- Dudhia, J. (1989) ‘Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model’, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46(20), pp. 3077–3107. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2).
- Dudhia, J., Hong, S.-Y. and Lim, K.-S. (2008) ‘A New Method for Representing Mixed-phase Particle Fall Speeds in Bulk Microphysics Parameterizations’, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 86A, pp. 33–44. Available at: <https://doi.org/10.2151/jmsj.86A.33>.
- 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(4), pp. 571–591. Available at: [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).
- Giannaros, T.M., Kotroni, V. and Lagouvardos, K. (2016) ‘WRF-LTNGDA: A lightning data assimilation technique implemented in the WRF model for improving precipitation forecasts’, *Environmental Modelling & Software*, 76, pp. 54–68. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.11.017>.
- Gilmore, M.S., Straka, J.M. and Rasmussen, E.N. (2004) ‘Precipitation Uncertainty Due to Variations in Precipitation Particle Parameters within a Simple Microphysics Scheme’, *Monthly Weather Review*, 132(11), pp. 2610–2627. Available at: <https://doi.org/10.1175/MWR2810.1>.
- Grell, G.A. (1993) ‘Prognostic Evaluation of Assumptions Used by Cumulus Parameterizations’, *Monthly Weather Review*, 121(3), pp. 764–787. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121<0764:PEOAUB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<0764:PEOAUB>2.0.CO;2).
- Grell, G.A. and Dévényi, D. (2002) ‘A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques’, *Geophysical Research Letters*, 29(14). Available at: <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’, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(10), pp. 5233–5250. Available at: <https://doi.org/10.5194/acp-14-5233-2014>.
- Grenier, H. and Bretherton, C.S. (2001) ‘A Moist PBL Parameterization for Large-Scale Models and Its Application to Subtropical Cloud-Topped Marine Boundary Layers’, *Monthly Weather Review*, 129(3), pp. 357–377. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0357:AMPPFL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0357:AMPPFL>2.0.CO;2).
- Han, J. and Pan, H.-L. (2011) ‘Revision of Convection and Vertical Diffusion Schemes in the NCEP Global Forecast System’, *Weather and Forecasting*, 26(4), pp. 520–533. Available at: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-10-05038.1>.
- Han, J., Witek, M.L., Teixeira, J., Sun, R., Pan, H.-L., Fletcher, J.K. and Bretherton, C.S. (2016) ‘Implementation in the NCEP GFS of a Hybrid Eddy-Diffusivity Mass-Flux (EDMF) Boundary Layer Parameterization with Dissipative Heating and Modified Stable Boundary Layer Mixing’, *Weather and Forecasting*, 31(1), pp. 341–352. Available at: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-15-0053.1>.
- Han, J.-Y., Hong, S.-Y. and Kwon, Y.C. (2020) ‘The Performance of a Revised Simplified Arakawa–Schubert (SAS) Convection Scheme in the Medium-Range Forecasts of the Korean Integrated Model (KIM)’, *Weather and Forecasting*, 35(3), pp. 1113–1128. Available at: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-19-0219.1>.

- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., De Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S. and Thépaut, J. (2020) ‘The ERA5 global reanalysis’, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), pp. 1999–2049. Available at: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- Hidalgo, J. and Jouglu, R. (2018) ‘On the use of local weather types classification to improve climate understanding: An application on the urban climate of Toulouse’, *PLOS ONE*. Edited by J.M. Dias, 13(12), p. e0208138. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208138>.
- Hogan, R.J. and Mason, I.B. (2011) ‘Deterministic Forecasts of Binary Events’, in I.T. Jolliffe and D.B. Stephenson (eds) *Forecast Verification*. 1st edn. Wiley, pp. 31–59. Available at: <https://doi.org/10.1002/9781119960003.ch3>.
- Hong, S.-Y., Dudhia, J. and Chen, S.-H. (2004) ‘A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation’, *Monthly Weather Review*, 132(1), pp. 103–120. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2).
- Hong, S.-Y., Juang, H.-M.H. and Zhao, Q. (1998) ‘Implementation of Prognostic Cloud Scheme for a Regional Spectral Model’, *Monthly Weather Review*, 126(10), pp. 2621–2639. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<2621:IOPCSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<2621:IOPCSF>2.0.CO;2).
- Hong, S.-Y. and Lim, J.-O.J. (2006) ‘The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6)’, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 42(2), pp. 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(9), pp. 2318–2341. Available at: <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>.
- Hong, S.-Y. and Pan, H.-L. (1996) ‘Nonlocal Boundary Layer Vertical Diffusion in a Medium-Range Forecast Model’, *Monthly Weather Review*, 124(10), pp. 2322–2339. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1996\)124<2322:NBLVDI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1996)124<2322:NBLVDI>2.0.CO;2).
- Houssos, E.E., Lolis, C.J., Gkikas, A., Hatzianastassiou, N. and Bartzokas, A. (2012) ‘On the atmospheric circulation characteristics associated with fog in Ioannina, north-western Greece’, *International Journal of Climatology*, 32(12), pp. 1847–1862. Available at: <https://doi.org/10.1002/joc.2399>.
- 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: Atmospheres*, 113(D13), p. 2008JD009944. Available at: <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>.
- Ionescu, V.-S., Czibula, G. and Mihuleț, E. (2021) ‘DeePS at: A deep learning model for prediction of satellite images for nowcasting purposes’, *Procedia Computer Science*, 192, pp. 622–631. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.08.064>.
- Janjic, Z.I. (2003) ‘A nonhydrostatic model based on a new approach’, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 82(1–4), pp. 271–285. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00703-001-0587-6>.

- Janjić, Z.I. (2000) ‘Comments on “Development and Evaluation of a Convection Scheme for Use in Climate Models”’, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 57(21), pp. 3686–3686. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2000\)057<3686:CODAEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2000)057<3686:CODAEO>2.0.CO;2).
- Janjić, Z.I. (2001) ‘Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso model’. NCEP Office Note, No. 437, pp. 61.
- Janjić, Z.I. (1994) ‘The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes’, *Monthly Weather Review*, 122(5), pp. 927–945. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2).
- Janjić, Z.I. (1996) ‘The surface layer in the NCEP Eta Model’, in. *Preprints, 11th Conf. on Numerical Weather Prediction, Norfolk, VA, Amer. Meteor. Soc.*, p. 355.
- Jiménez, P.A. and Dudhia, J. (2012) ‘Improving the Representation of Resolved and Unresolved Topographic Effects on Surface Wind in the WRF Model’, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(2), pp. 300–316. Available at: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-084.1>.
- Kain, J.S. (2004) ‘The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update’, *Journal of Applied Meteorology*, 43(1), pp. 170–181. Available at: [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).
- Kain, J.S. and Fritsch, J.M. (1990) ‘A One-Dimensional Entraining/Detraining Plume Model and Its Application in Convective Parameterization’, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47(23), pp. 2784–2802. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047<2784:AODEPM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047<2784:AODEPM>2.0.CO;2).
- Kain, J.S. and Fritsch, J.M. (1993) ‘Convective Parameterization for Mesoscale Models: The Kain–Fritsch Scheme’, in K.A. Emanuel and D.J. Raymond (eds) *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models*. Boston, MA: American Meteorological Society, pp. 165–170. Available at: https://doi.org/10.1007/978-1-935704-13-3_16.
- Kalkstein, L.S., Nichols, M.C., Barthel, C.D. and Greene, J.S. (1996) ‘A NEW SPATIAL SYNOPTIC CLASSIFICATION: APPLICATION TO AIR-MASS ANALYSIS’, *International Journal of Climatology*, 16(9), pp. 983–1004. Available at: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199609\)16:9<983::AID-JOC61>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199609)16:9<983::AID-JOC61>3.0.CO;2-N).
- Kalkstein, L.S., Tan, G. and Skindlov, J.A. (1987) ‘An Evaluation of Three Clustering Procedures for Use in Synoptic Climatological Classification’, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26(6), pp. 717–730. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1987\)026<0717:AEOTCP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1987)026<0717:AEOTCP>2.0.CO;2).
- Kessler, E. (1969) ‘On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations’, in E. Kessler, *On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations*. Boston, MA: American Meteorological Society, pp. 1–84. Available at: https://doi.org/10.1007/978-1-935704-36-2_1.
- Kim, H., Heo, K.-Y., Kim, N.-H. and Kwon, J.-I. (2021) ‘Hindcasts of Sea Surface Wind around the Korean Peninsula Using the WRF Model: Added Value Evaluation and Estimation of Extreme Wind Speeds’, *Atmosphere*, 12(7), p. 895. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos12070895>.
- Kotroni, V. and Lagouvardos, K. (2004) ‘Evaluation of MM5 High-Resolution Real-Time Forecasts over the Urban Area of Athens, Greece’, *Journal of Applied Meteorology*, 43(11), pp. 1666–1678. Available at: <https://doi.org/10.1175/JAM2170.1>.

- Lagouvardos, K., Kotroni, V., Bezes, A., Koletsis, I., Kopania, T., Lykoudis, S., Mazarakis, N., Papagiannaki, K. and Vougioukas, S. (2017) ‘The automatic weather stations NOANN network of the National Observatory of Athens: operation and database’, *Geoscience Data Journal*, 4(1), pp. 4–16. Available at: <https://doi.org/10.1002/gdj3.44>.
- Lagouvardos, K., Kotroni, V., Koussis, A., Feidas, H., Buzzi, A. and Malguzzi, P. (2003) ‘The Meteorological Model BOLAM at the National Observatory of Athens: Assessment of Two-Year Operational Use’, *Journal of Applied Meteorology*, 42(11), pp. 1667–1678. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042<1667:TMMBAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042<1667:TMMBAT>2.0.CO;2).
- Lang, S.E., Tao, W.-K., Chern, J.-D., Wu, D. and Li, X. (2014) ‘Benefits of a Fourth Ice Class in the Simulated Radar Reflectivities of Convective Systems Using a Bulk Microphysics Scheme’, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 71(10), pp. 3583–3612. Available at: <https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0330.1>.
- Laprise, R. (1992) ‘The Euler Equations of Motion with Hydrostatic Pressure as an Independent Variable’, *Monthly Weather Review*, 120(1), pp. 197–207. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1992\)120<0197:TEEOMW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1992)120<0197:TEEOMW>2.0.CO;2).
- Lee, T.R., Leeper, R.D., Wilson, T., Diamond, H.J., Meyers, T.P. and Turner, D.D. (2023) ‘Using the U.S. Climate Reference Network to Identify Biases in Near- and Subsurface Meteorological Fields in the High-Resolution Rapid Refresh (HRRR) Weather Prediction Model’, *Weather and Forecasting*, 38(6), pp. 879–900. Available at: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-22-0213.1>.
- Lim, K.-S.S. and Hong, S.-Y. (2010) ‘Development of an Effective Double-Moment Cloud Microphysics Scheme with Prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for Weather and Climate Models’, *Monthly Weather Review*, 138(5), pp. 1587–1612. Available at: <https://doi.org/10.1175/2009MWR2968.1>.
- Lin, Y. and Colle, B.A. (2011) ‘A New Bulk Microphysical Scheme That Includes Riming Intensity and Temperature-Dependent Ice Characteristics’, *Monthly Weather Review*, 139(3), pp. 1013–1035. Available at: <https://doi.org/10.1175/2010MWR3293.1>.
- Lin, Y.-L., Farley, R.D. and Orville, H.D. (1983) ‘Bulk Parameterization of the Snow Field in a Cloud Model’, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22(6), pp. 1065–1092. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1983\)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2).
- Littmann, T. (2000) ‘An empirical classification of weather types in the Mediterranean Basin and their interrelation with rainfall’, *Theoretical and Applied Climatology*, 66(3–4), pp. 161–171. Available at: <https://doi.org/10.1007/s007040070022>.
- Lolis, C. and Türkeş, M. (2016) ‘Atmospheric circulation characteristics favouring extreme precipitation in Turkey’, *Climate Research*, 71(2), pp. 139–153. Available at: <https://doi.org/10.3354/cr01433>.
- Lolis, C.J. and Kotsias, G. (2020) ‘The use of weather types in the definition of seasons: the case of southern Balkans’, *Theoretical and Applied Climatology*, 142(3–4), pp. 1199–1219. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03369-z>.
- Lolis, C.J., Kotsias, G. and Bartzokas, A. (2018) ‘Objective Definition of Climatologically Homogeneous Areas in the Southern Balkans Based on the ERA5 Data Set’, *Climate*, 6(4), p. 96. Available at: <https://doi.org/10.3390/cli6040096>.

- Maheras, P. (1984) ‘Weather-type classification by factor analysis in the Thessaloniki area’, *Journal of Climatology*, 4(4), pp. 437–443. Available at: <https://doi.org/10.1002/joc.3370040408>.
- Maheras, P., Flocas, H.A., Patrikas, I. and Anagnostopoulou, Chr. (2001) ‘A 40 year objective climatology of surface cyclones in the Mediterranean region: spatial and temporal distribution’, *International Journal of Climatology*, 21(1), pp. 109–130. Available at: <https://doi.org/10.1002/joc.599>.
- Manly, B.F.J. (1986) ‘Multivariate statistical methods a primer’, in *Multivariate statistical methods a primer*. London: Chapman and Hall, pp. 1–159.
- Mansell, E.R., Ziegler, C.L. and Bruning, E.C. (2010) ‘Simulated Electrification of a Small Thunderstorm with Two-Moment Bulk Microphysics’, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67(1), pp. 171–194. Available at: <https://doi.org/10.1175/2009JAS2965.1>.
- Matějka, M., Láska, K., Jeklová, K. and Hošek, J. (2021) ‘High-Resolution Numerical Modelling of Near-Surface Atmospheric Fields in the Complex Terrain of James Ross Island, Antarctic Peninsula’, *Atmosphere*, 12(3), p. 360. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos12030360>.
- Mazarakis, N., Kotroni, V., Lagouvardos, K. and Argiriou, A.A. (2009) ‘The sensitivity of numerical forecasts to convective parameterization during the warm period and the use of lightning data as an indicator for convective occurrence’, *Atmospheric Research*, 94(4), pp. 704–714. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.03.002>.
- Mazarakis, N., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Argiriou, A.A. and Anderson, C.J. (2011) ‘The sensitivity of warm period precipitation forecasts to various modifications of the Kain-Fritsch Convective Parameterization scheme’, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(5), pp. 1327–1339. Available at: <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1327-2011>.
- Milbrandt, J.A. and Yau, M.K. (2005) ‘A Multimoment Bulk Microphysics Parameterization. Part I: Analysis of the Role of the Spectral Shape Parameter’, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(9), pp. 3051–3064. Available at: <https://doi.org/10.1175/JAS3534.1>.
- Morrison, H. and Milbrandt, J.A. (2015) ‘Parameterization of Cloud Microphysics Based on the Prediction of Bulk Ice Particle Properties. Part I: Scheme Description and Idealized Tests’, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 72(1), pp. 287–311. Available at: <https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0065.1>.
- Morrison, H., Thompson, G. and Tatarskii, V. (2009) ‘Impact of Cloud Microphysics on the Development of Trailing Stratiform Precipitation in a Simulated Squall Line: Comparison of One- and Two-Moment Schemes’, *Monthly Weather Review*, 137(3), pp. 991–1007. Available at: <https://doi.org/10.1175/2008MWR2556.1>.
- Neale, R.B., Chen, C.-C., Gettelman, A., Lauritzen, P.H., Park, S., Williamson, D.L., Conley, A.J., Garcia, R., Kinnison, D. and Lamarque, J.-F. (2010) ‘Description of the NCAR community atmosphere model (CAM 5.0)’, *NCAR Tech. Note Ncar/tn-486+ STR*, 1(1), pp. 1–12.
- Ooyama, K.V. (1990) ‘A Thermodynamic Foundation for Modeling the Moist Atmosphere’, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47(21), pp. 2580–2593. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047<2580:ATFFMT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047<2580:ATFFMT>2.0.CO;2).

- Pan, L., Liu, Y., Knierel, J., Delle Monache, L. and Roux, G. (2018) 'Evaluations of WRF Sensitivities in Surface Simulations with an Ensemble Prediction System', *Atmosphere*, 9(3), p. 106. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos9030106>.
- Park, S.-H., Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Fowler, L.D. and Duda, M.G. (2013) 'Evaluation of Global Atmospheric Solvers Using Extensions of the Jablonowski and Williamson Baroclinic Wave Test Case', *Monthly Weather Review*, 141(9), pp. 3116–3129. Available at: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00096.1>.
- Piotrowicz, K. and Ciaranek, D. (2020) 'A selection of weather type classification systems and examples of their application', *Theoretical and Applied Climatology*, 140(1–2), pp. 719–730. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03118-2>.
- Pleim, J.E. (2007) 'A Combined Local and Nonlocal Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Part I: Model Description and Testing', *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(9), pp. 1383–1395. Available at: <https://doi.org/10.1175/JAM2539.1>.
- Putniković, S. and Tošić, I. (2018) 'Relationship between atmospheric circulation weather types and seasonal precipitation in Serbia', *Meteorology and Atmospheric Physics*, 130(4), pp. 393–403. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00703-017-0524-y>.
- Richman, M.B. (1986) 'Rotation of principal components', *Journal of Climatology*, 6(3), pp. 293–335. Available at: <https://doi.org/10.1002/joc.3370060305>.
- Rivolta, G., Marzano, F.S., Coppola, E. and Verdecchia, M. (2006) 'Artificial neural-network technique for precipitation nowcasting from satellite imagery', *Advances in Geosciences*, 7, pp. 97–103. Available at: <https://doi.org/10.5194/adgeo-7-97-2006>.
- Rodrigo, C., Kim, S. and Jung, I. (2018) 'Sensitivity Study of WRF Numerical Modeling for Forecasting Heavy Rainfall in Sri Lanka', *Atmosphere*, 9(10), p. 378. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos9100378>.
- Rogers, E., Black, T., Ferrier, B., Lin, Y., Parrish, D. and DiMego, G. (2001) 'Changes to the NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System: Increase in resolution, new cloud microphysics, modified precipitation assimilation, modified 3DVAR analysis', *NWS Technical Procedures Bulletin*, 488, p. 15.
- Rutledge, S.A. and Hobbs, P.V. (1984) 'The Mesoscale and Microscale Structure and Organization of Clouds and Precipitation in Midlatitude Cyclones. XII: A Diagnostic Modeling Study of Precipitation Development in Narrow Cold-Frontal Rainbands', *Journal of the Atmospheric Sciences*, 41(20), pp. 2949–2972. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1984\)041<2949:TMAMSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1984)041<2949:TMAMSA>2.0.CO;2).
- Sandeepan, B.S., Panchang, V.G., Nayak, S., Kumar, K.K. and Kaihatu, J.M. (2018) 'Performance of the WRF Model for Surface Wind Prediction around Qatar', *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 35(3), pp. 575–592. Available at: <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-17-0125.1>.
- Schaefer, J.T. (1990) 'The Critical Success Index as an Indicator of Warning Skill', *Weather and Forecasting*, 5(4), pp. 570–575. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1990\)005<0570:TCSIAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1990)005<0570:TCSIAA>2.0.CO;2).
- Sharma, M. and Batra, A. (2014) 'Analysis of distance measures in content based image retrieval', *Global Journal of Computer Science and Technology*, 14(2), p. 7.

- Sharma, S. (1995) *Applied multivariate techniques*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Sheridan, S.C. (2002) ‘The redevelopment of a weather-type classification scheme for North America’, *International Journal of Climatology*, 22(1), pp. 51–68. Available at: <https://doi.org/10.1002/joc.709>.
- Sheridan, S.C. (2003) ‘North American weather-type frequency and teleconnection indices’, *International Journal of Climatology*, 23(1), pp. 27–45. Available at: <https://doi.org/10.1002/joc.863>.
- Sindosi, O.A., Bartzokas, A., Kotroni, V. and Lagouvardos, K. (2012) ‘Verification of precipitation forecasts of MM5 model over Epirus, NW Greece, for various convective parameterization schemes’, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(5), pp. 1393–1405. Available at: <https://doi.org/10.5194/nhess-12-1393-2012>.
- Sindosi, O.A., Bartzokas, A., Kotroni, V. and Lagouvardos, K. (2015) ‘Influence of orography on precipitation amount and distribution in NW Greece; A case study’, *Atmospheric Research*, 152, pp. 105–122. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.06.013>.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Wang, W. and Powers, J.G. (2005) ‘A Description of the Advanced Research WRF Version 2’, *NCAR Tech Note, NCAR/TN-468+STR*, pp. 88.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J.G., Duda, M.G. and Barker, D.M. (2019) ‘A description of the advanced research WRF version 4’, *NCAR tech. note ncar/tn-556+ str*, 145.
- Sugar, C.A. and James, G.M. (2003) ‘Finding the Number of Clusters in a Dataset: An Information-Theoretic Approach’, *Journal of the American Statistical Association*, 98(463), pp. 750–763. Available at: <https://doi.org/10.1198/016214503000000666>.
- Tao, W., Wu, D., Lang, S., Chern, J., Peters-Lidard, C., Fridlind, A. and Matsui, T. (2016) ‘High-resolution NU-WRF simulations of a deep convective-precipitation system during MC3E: Further improvements and comparisons between Goddard microphysics schemes and observations’, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(3), pp. 1278–1305. Available at: <https://doi.org/10.1002/2015JD023986>.
- Tao, W.-K., Simpson, J. and McCumber, M. (1989) ‘An Ice-Water Saturation Adjustment’, *Monthly Weather Review*, 117(1), pp. 231–235. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<0231:AIWSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<0231:AIWSA>2.0.CO;2).
- Teklay, A., Dile, Y.T., Asfaw, D.H., Bayabil, H.K. and Sisay, K. (2019) ‘Impacts of land surface model and land use data on WRF model simulations of rainfall and temperature over Lake Tana Basin, Ethiopia’, *Heliyon*, 5(9), p. e02469. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02469>.
- Tewari, M., Chen, F., Dudhia, J., Ray, P., Miao, S., Nikolopoulos, E. and Treinish, L. (2022) ‘Understanding the sensitivity of WRF hindcast of Beijing extreme rainfall of 21 July 2012 to microphysics and model initial time’, *Atmospheric Research*, 271, p. 106085. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106085>.
- Thompson, G. and Eidhammer, T. (2014) ‘A Study of Aerosol Impacts on Clouds and Precipitation Development in a Large Winter Cyclone’, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 71(10), pp. 3636–3658. Available at: <https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0305.1>.

- Thompson, G., Field, P.R., Rasmussen, R.M. and Hall, W.D. (2008) ‘Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization’, *Monthly Weather Review*, 136(12), pp. 5095–5115. Available at: <https://doi.org/10.1175/2008MWR2387.1>.
- Tiedtke, M. (1989) ‘A Comprehensive Mass Flux Scheme for Cumulus Parameterization in Large-Scale Models’, *Monthly Weather Review*, 117(8), pp. 1779–1800. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2).
- Trigo, I.F., Bigg, G.R. and Davies, T.D. (2002) ‘Climatology of Cyclogenesis Mechanisms in the Mediterranean’, *Monthly Weather Review*, 130(3), pp. 549–569. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130<0549:COCMIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<0549:COCMIT>2.0.CO;2).
- Wang, W., Bruyere, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill, D., Kavulich, M., Keene, K., Lin, H.-C., Michalakes, J. and Rizvi, S. (2017) ‘User’s guides for the advanced research WRF (ARW) modeling system’, *National Center for Atmospheric Research (NCAR)* [Preprint].
- Wu, T., Min, J. and Wu, S. (2019) ‘A comparison of the rainfall forecasting skills of the WRF ensemble forecasting system using SPCPT and other cumulus parameterization error representation schemes’, *Atmospheric Research*, 218, pp. 160–175. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.11.016>.
- Zhang, C. and Wang, Y. (2017) ‘Projected Future Changes of Tropical Cyclone Activity over the Western North and South Pacific in a 20-km-Mesh Regional Climate Model’, *Journal of Climate*, 30(15), pp. 5923–5941. Available at: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0597.1>.
- Zhang, C., Wang, Y. and Hamilton, K. (2011) ‘Improved Representation of Boundary Layer Clouds over the Southeast Pacific in ARW-WRF Using a Modified Tiedtke Cumulus Parameterization Scheme*’, *Monthly Weather Review*, 139(11), pp. 3489–3513. Available at: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-10-05091.1>.
- Zhang, F., Ren, B., Dou, C. and Wang, C. (2020) ‘Numerical Simulation of Near-Surface Atmospheric Conditions during a Radiation Fog over the Complex Terrain’, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 555(1), p. 012093. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/555/1/012093>.
- Zhang, G.J. and McFarlane, N.A. (1995) ‘Sensitivity of climate simulations to the parameterization of cumulus convection in the Canadian climate centre general circulation model’, *Atmosphere-Ocean*, 33(3), pp. 407–446. Available at: <https://doi.org/10.1080/07055900.1995.9649539>.
- Zheng, Y., Alapaty, K., Herwehe, J.A., Del Genio, A.D. and Niyogi, D. (2016) ‘Improving High-Resolution Weather Forecasts Using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model with an Updated Kain–Fritsch Scheme’, *Monthly Weather Review*, 144(3), pp. 833–860. Available at: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0005.1>.

Ζάμπακας Ι. (1981) Γενική Κλιματολογία. Αθήναι

Κατσούλης Β.Δ. (1970) Διατριβή επί διδακτορία «Αι ανεμολογικαί συνθήκαι εις το Αιγαίον Πέλαγος». Αθήναι.

Μαριολόπουλος Η. (1982) Το κλίμα της Ελλάδος. Ακαδημία Αθηνών. Κέντρο Ερεύνης Φυσικής της Ατμόσφαιρας και Κλιματολογίας. Δημοσίευμα αρ.7.

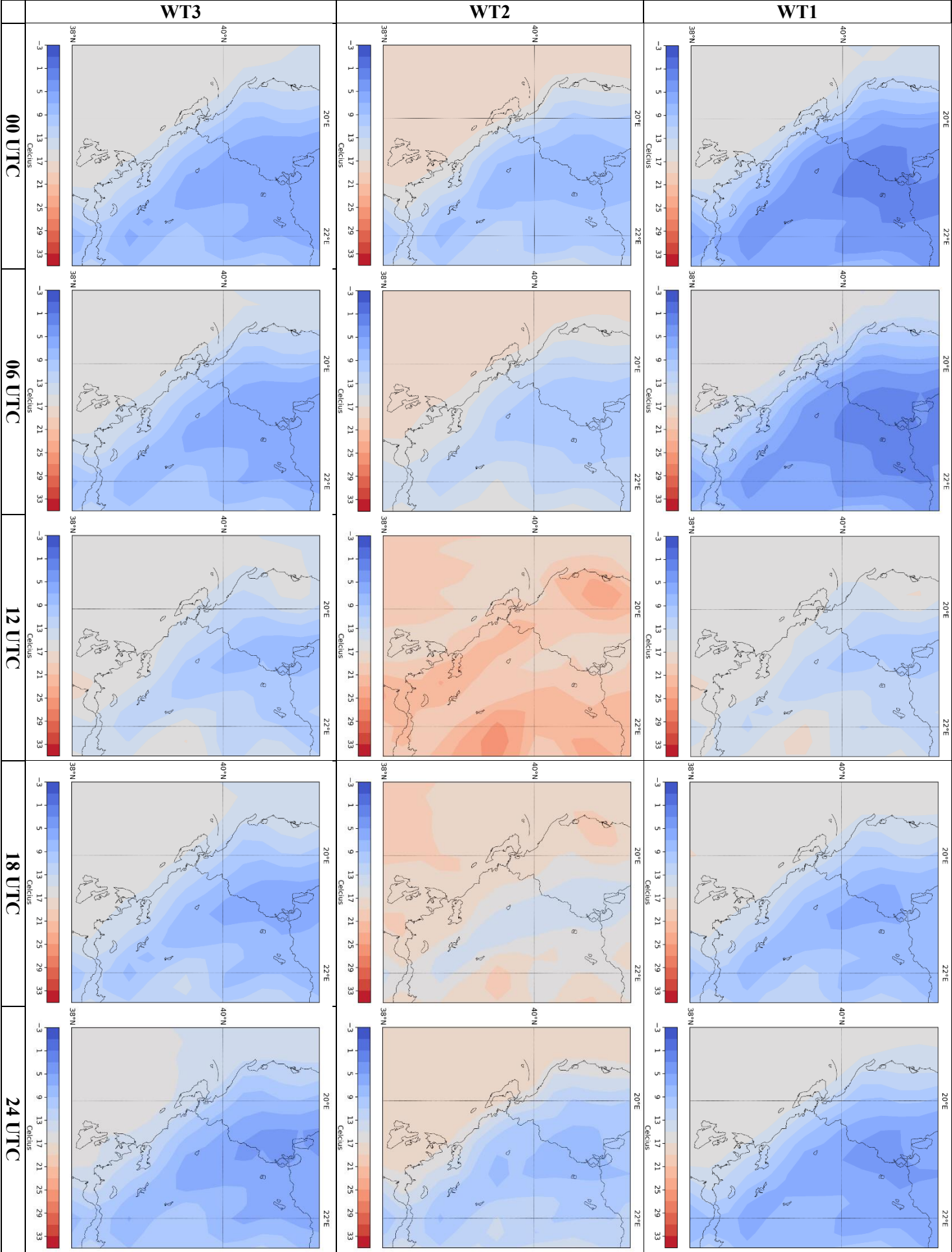
Σούλης Ν. (1994) Το κλίμα της Ηπείρου. Ιωάννινα.

ECMWF, (2024) © European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Parameter database, <https://codes.ecmwf.int/grib/param-db/>

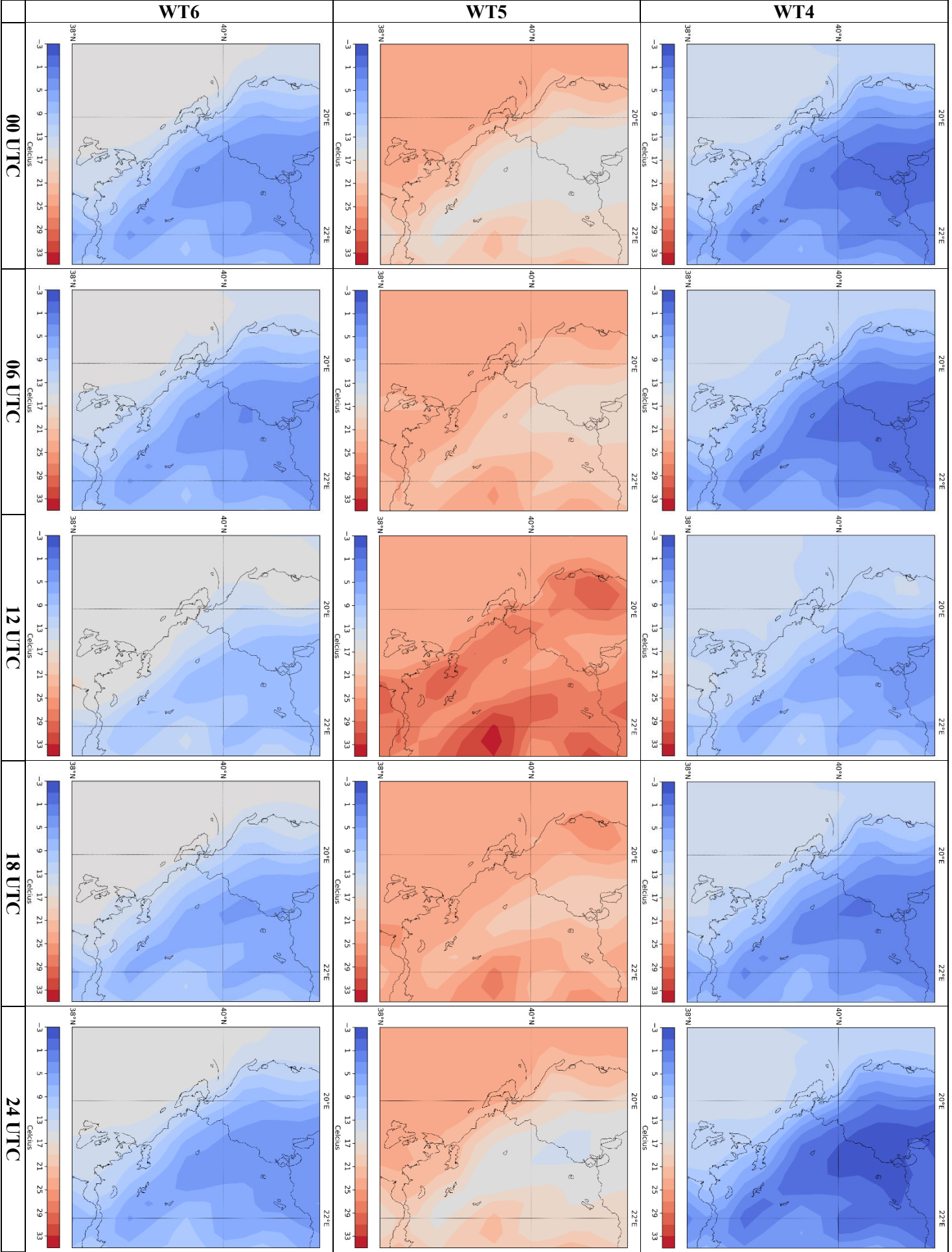
ΕΜΥ, (2024) Σχετικά με την ΕΜΥ, http://www.emy.gr/emyl/about_emy/sxetika-me-thn-emy

ΙΕΠΒΑ, (2024) Ιστορία ΙΕΠΒΑ, <https://www.iersd.noa.gr/istoria-iepva/>

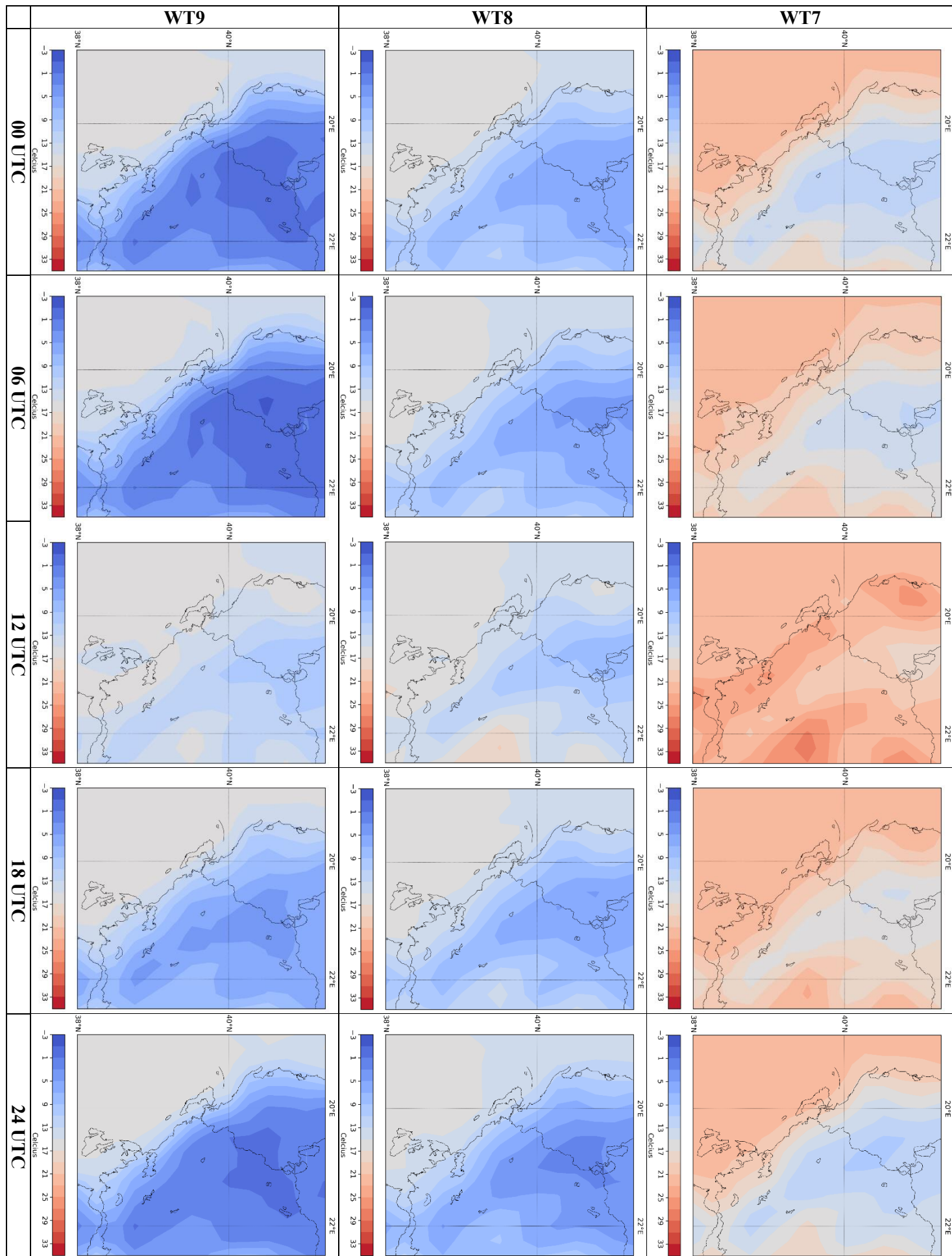
Παράρτημα Α



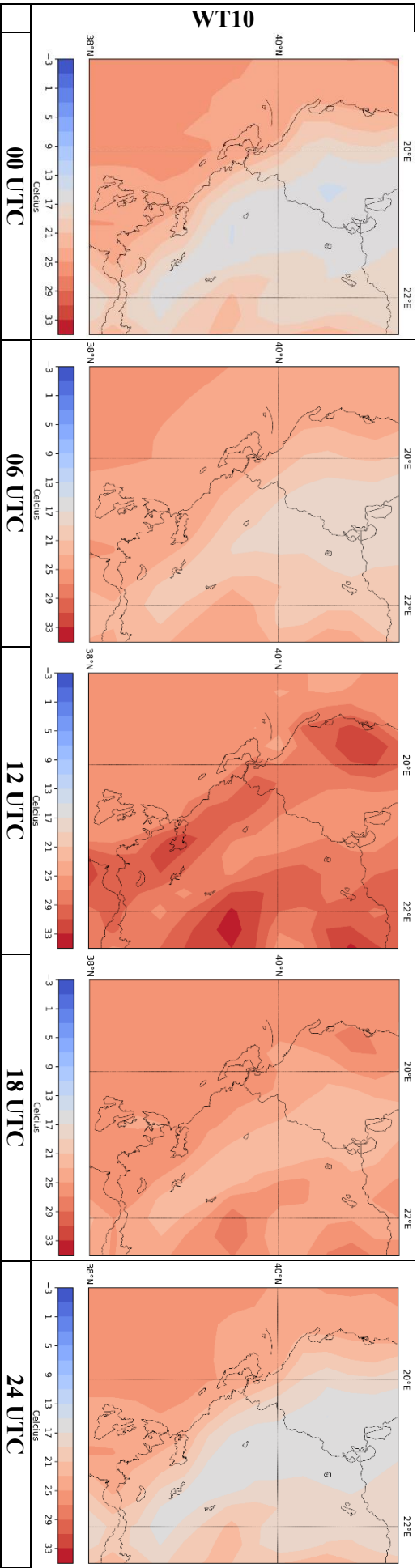
θερμοκρασία του αέρα (°C) στα 2 μέτρα



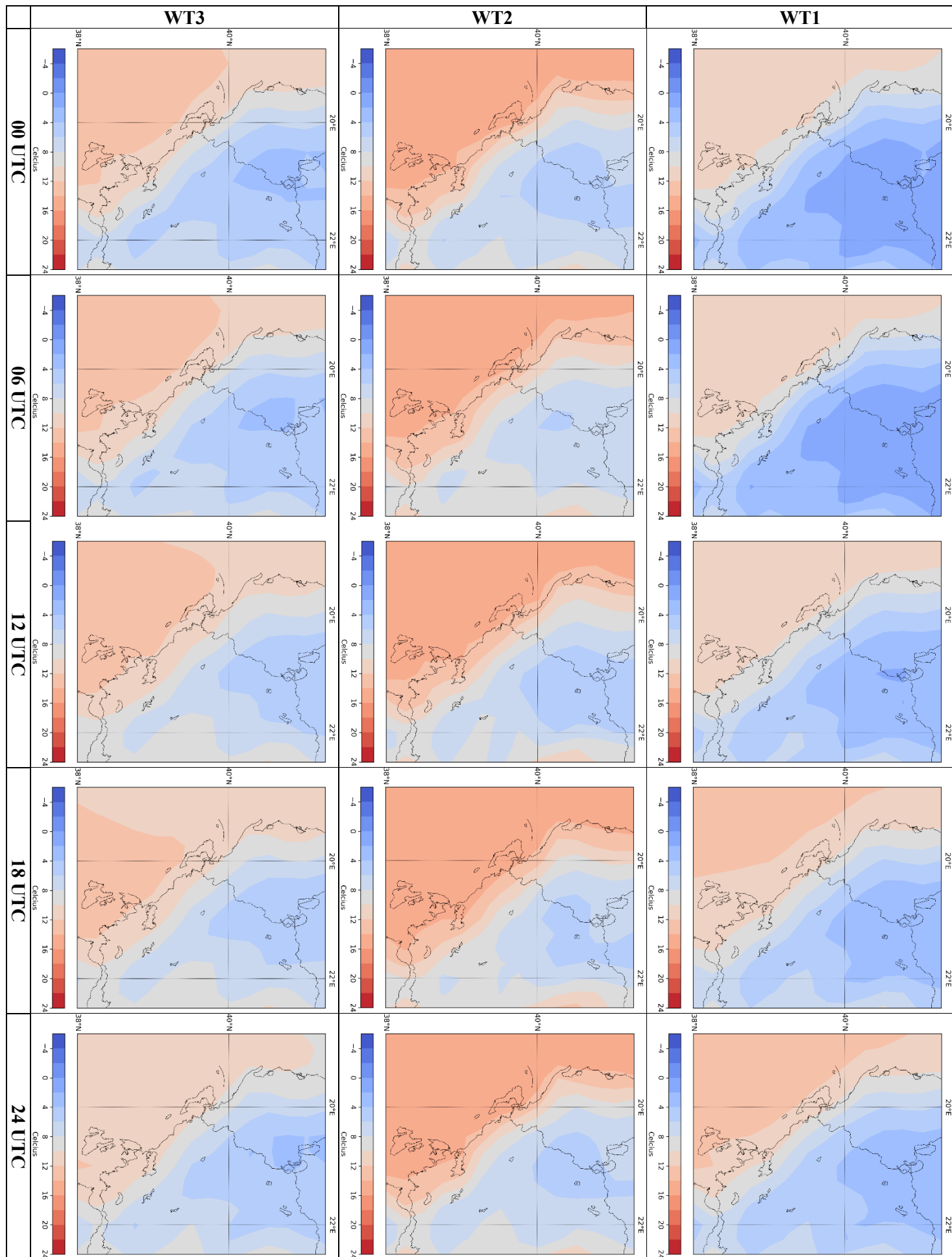
θερμοκρασία του αέρα (°C) στα 2 μέτρα



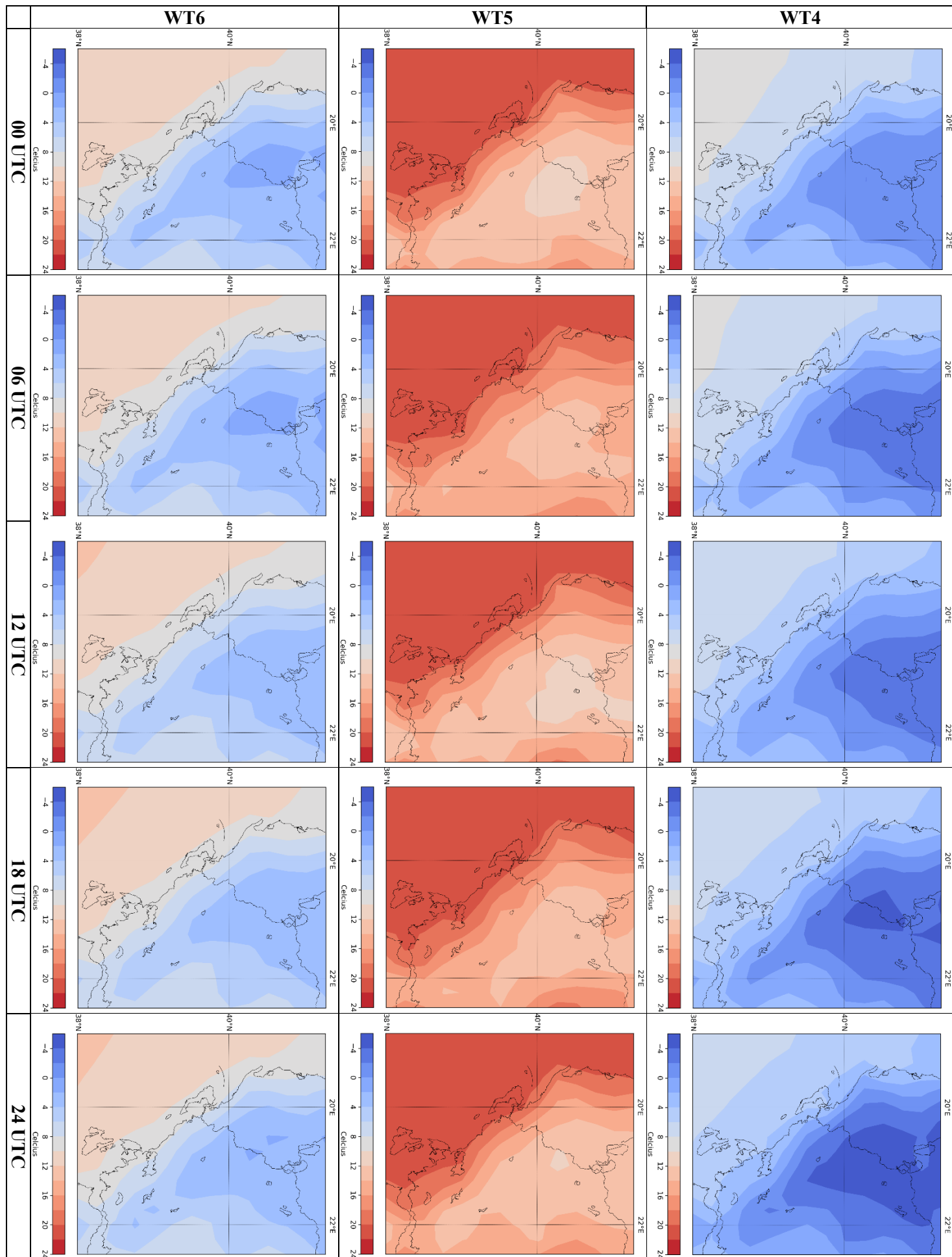
θερμοκρασία του αέρα (°C) στα 2 μέτρα



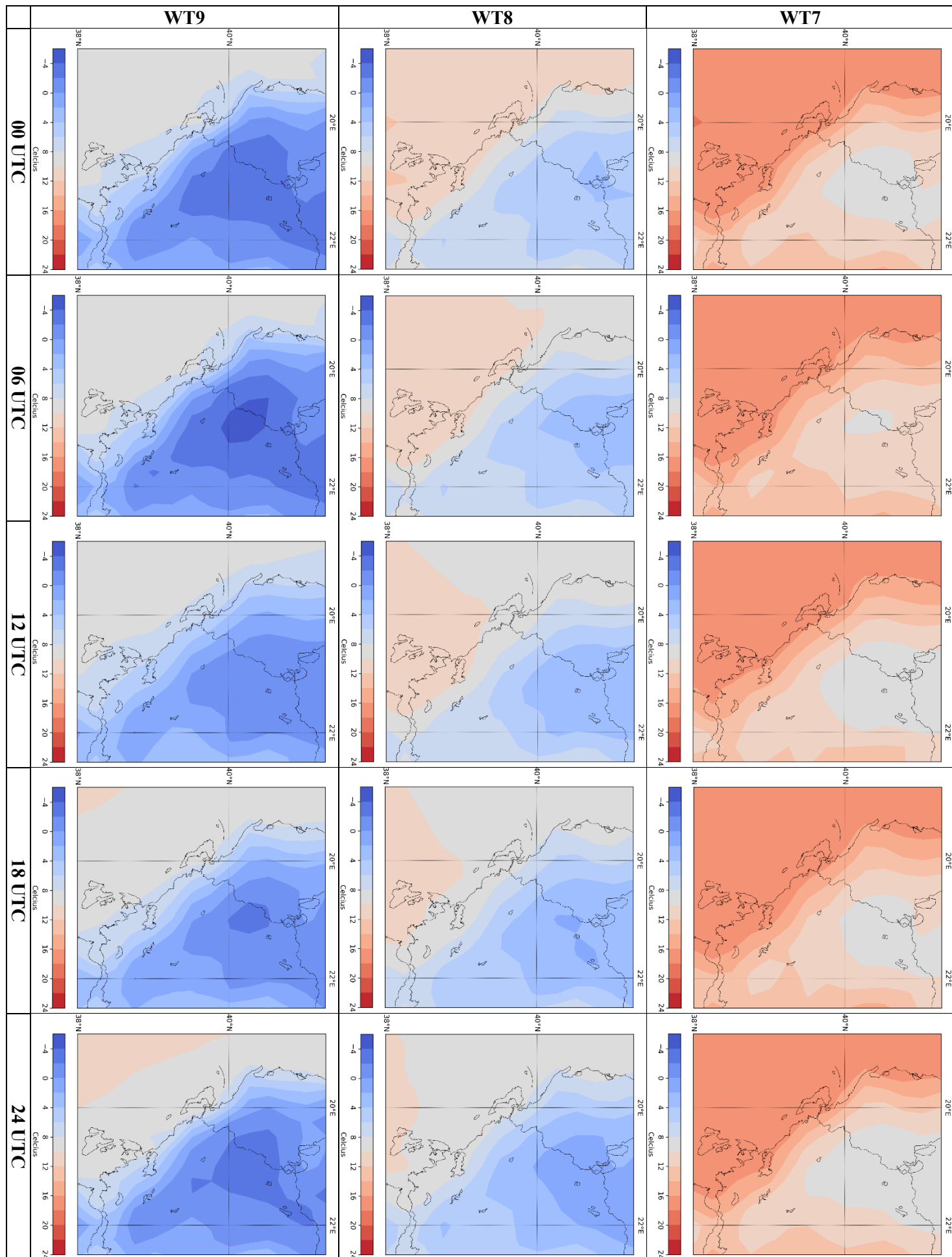
Σχήμα Α1. Χάρτες των μέσων χωρικών κατανομών (00, 06, 12, 18, και 24 UTC) της θερμοκρασίας του αέρα (°C) στα 2 μέτρα για όλους τους WTs.



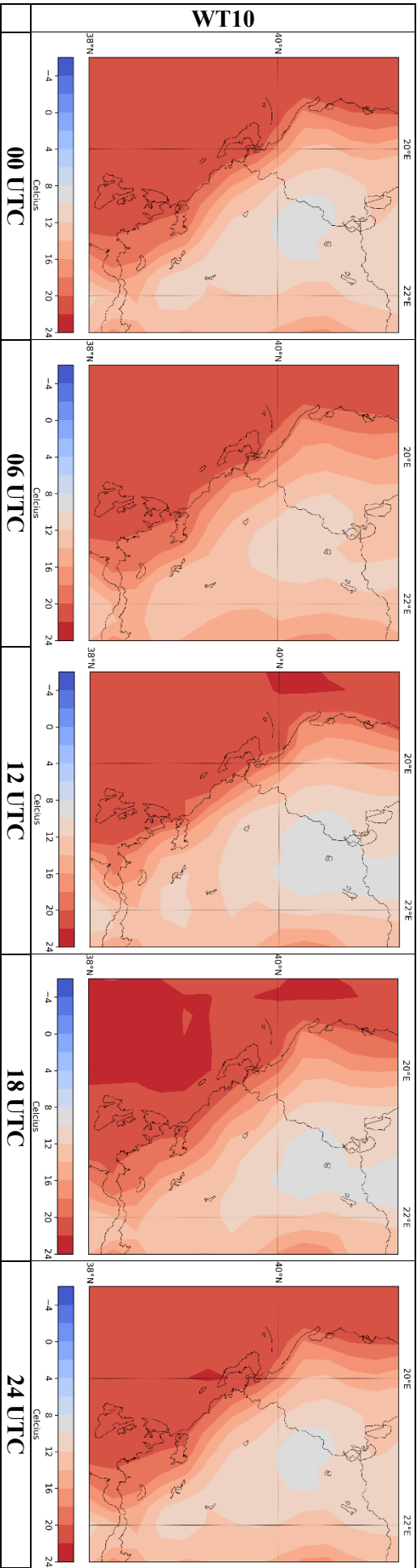
θερμοκρασία δρόσου (°C) στα 2 μέτρα



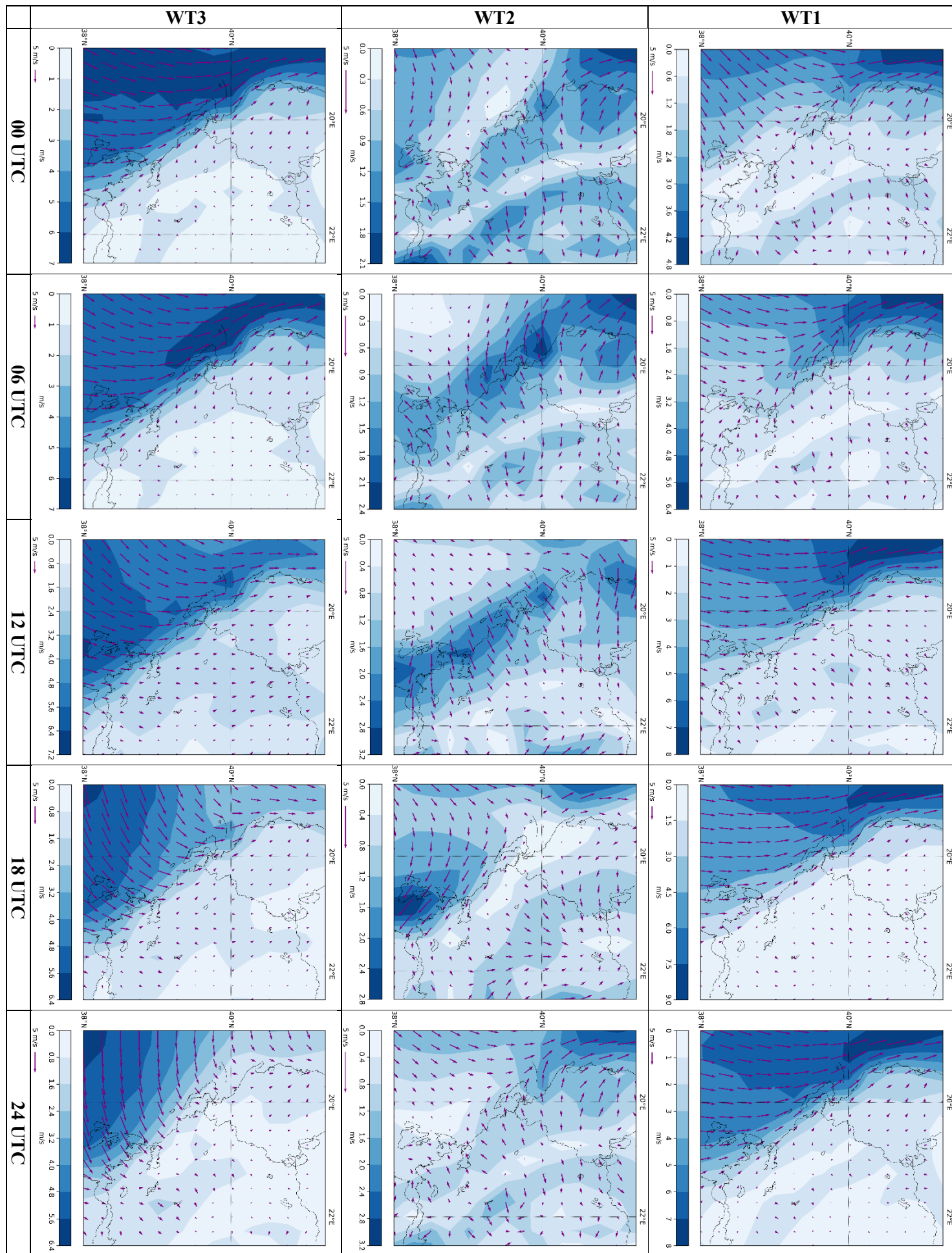
θερμοκρασία δρόσου (°C) στα 2 μέτρα



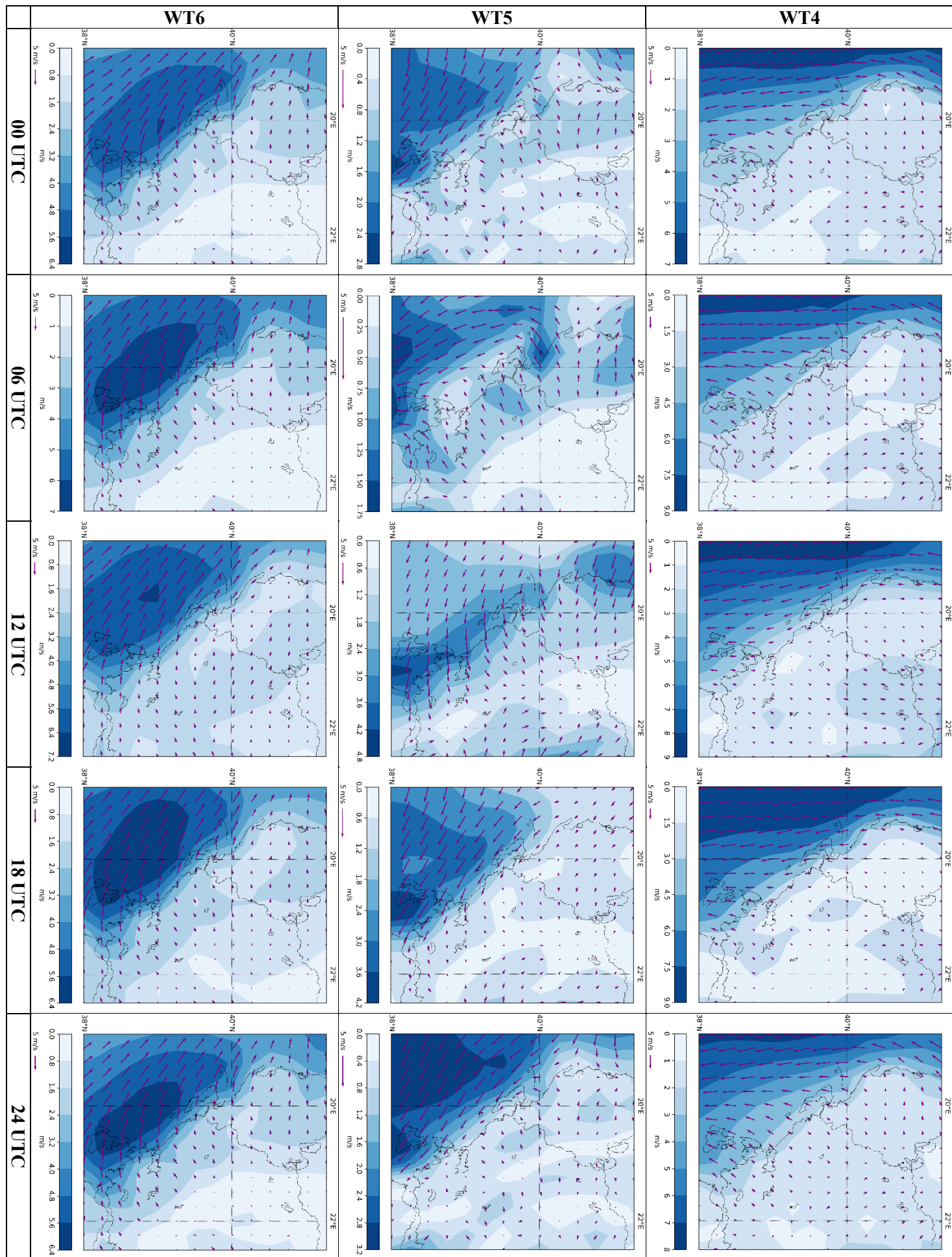
θερμοκρασία δρόσου (°C) στα 2 μέτρα



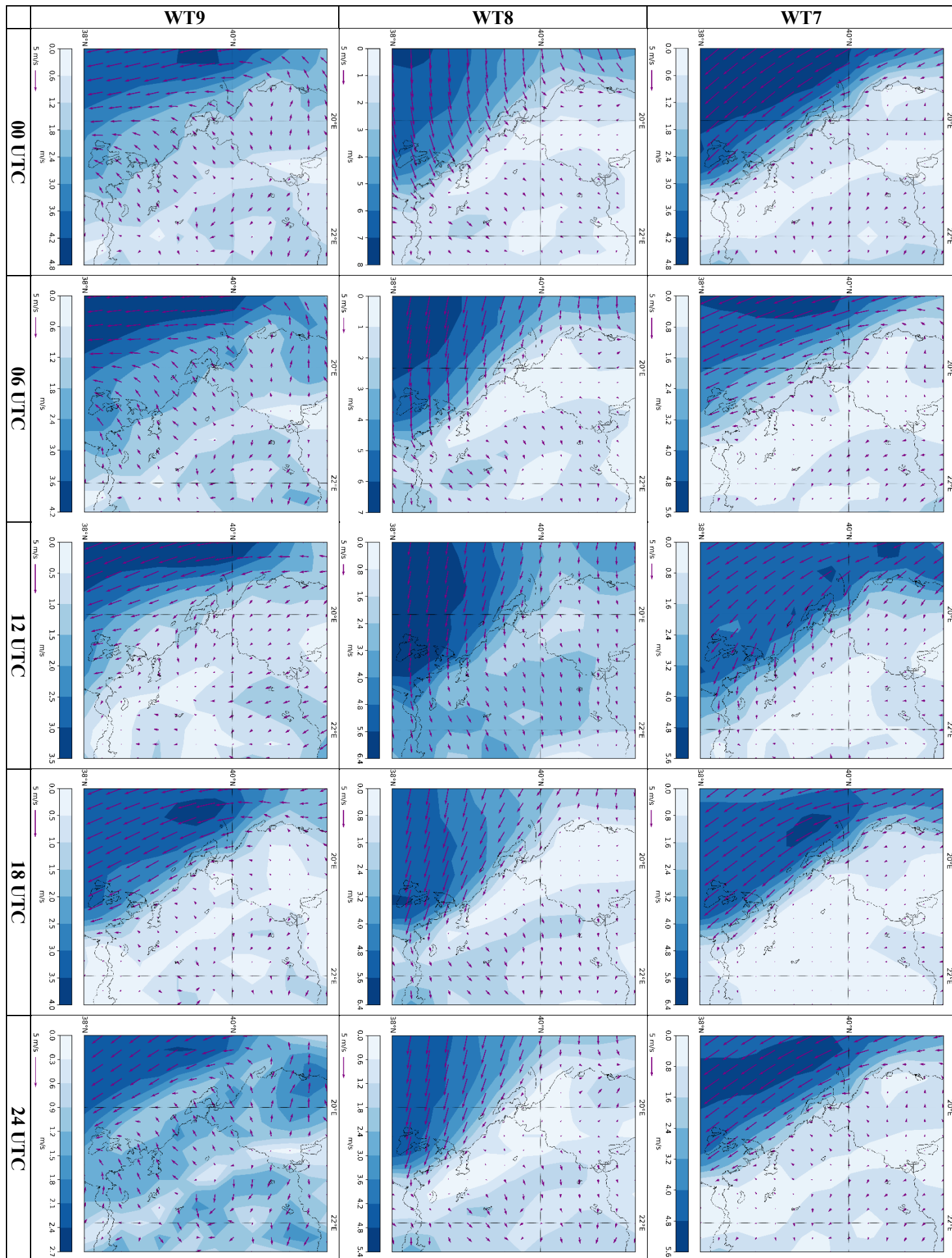
Σχήμα Α2. Χάρτες των μέσων χωρικών κατανομών (00, 06, 12, 18, και 24 UTC) της θερμοκρασίας δρόσου (°C) στα 2 μέτρα για όλους τους WTs.



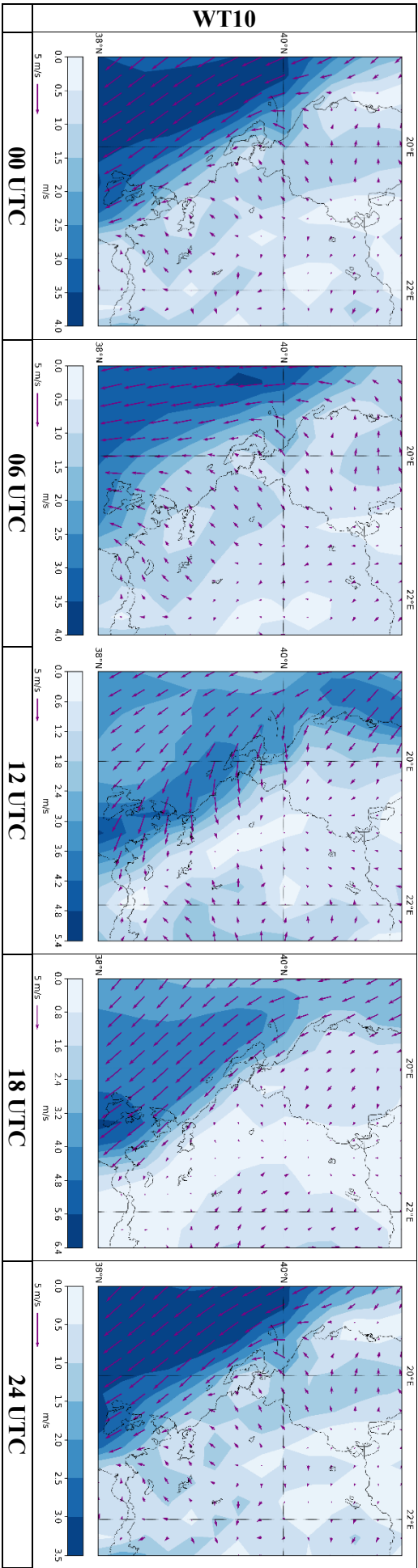
διεύθυνση και ταχύτητα του ανέμου (m/s) στα 10 μέτρα



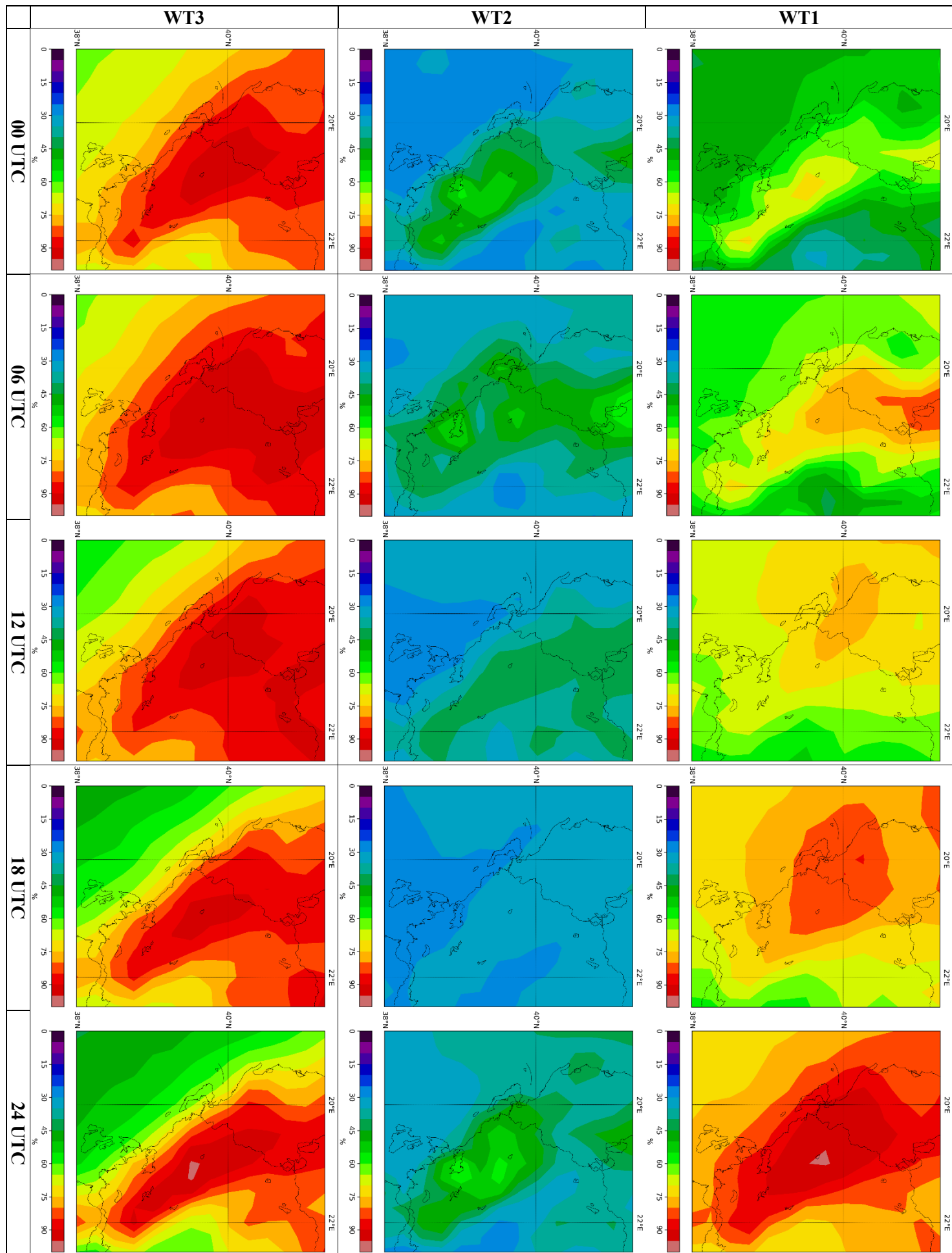
διεύθυνση και ταχύτητα του ανέμου (m/s) στα 10 μέτρα



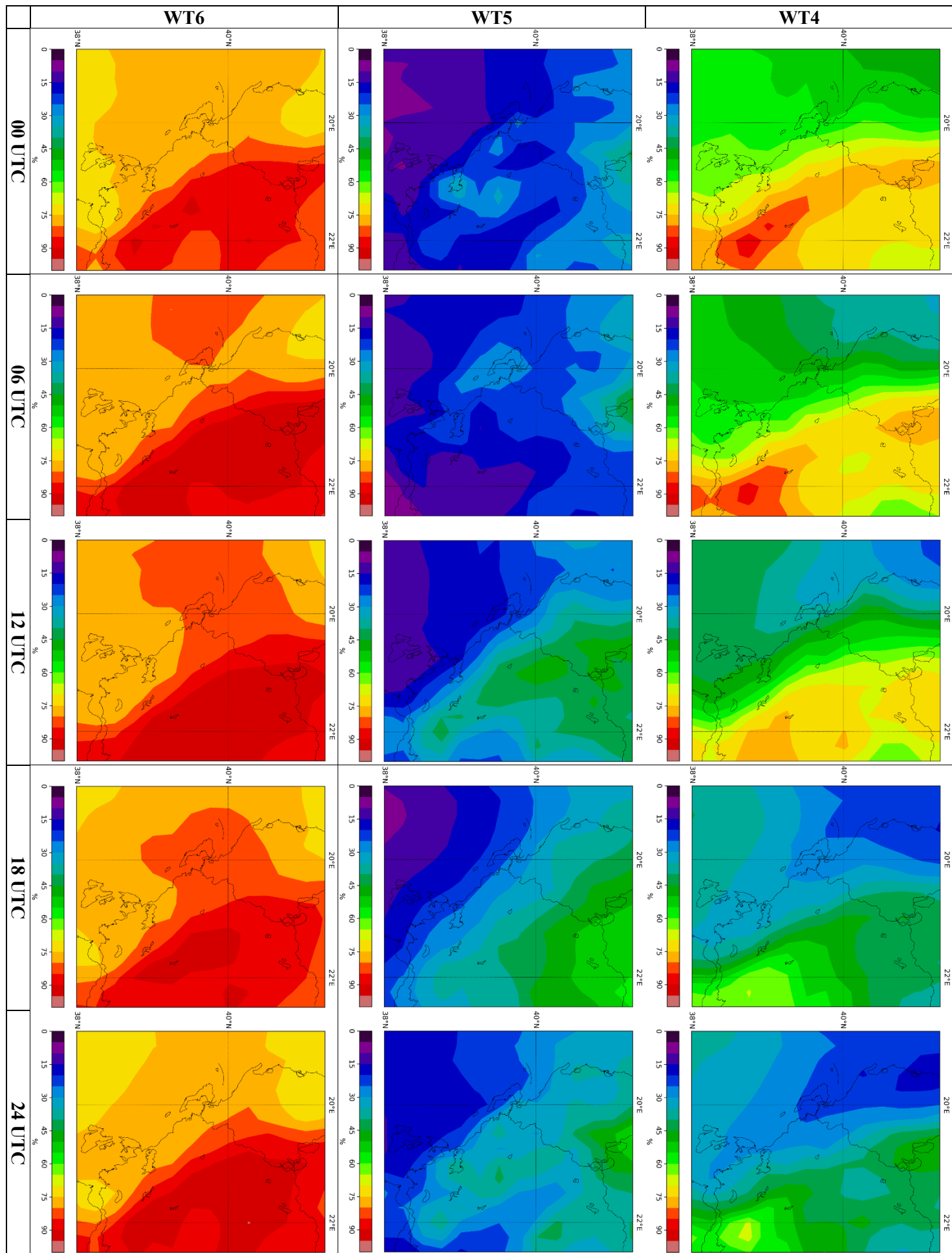
διεύθυνση και ταχύτητα του ανέμου (m/s) στα 10 μέτρα



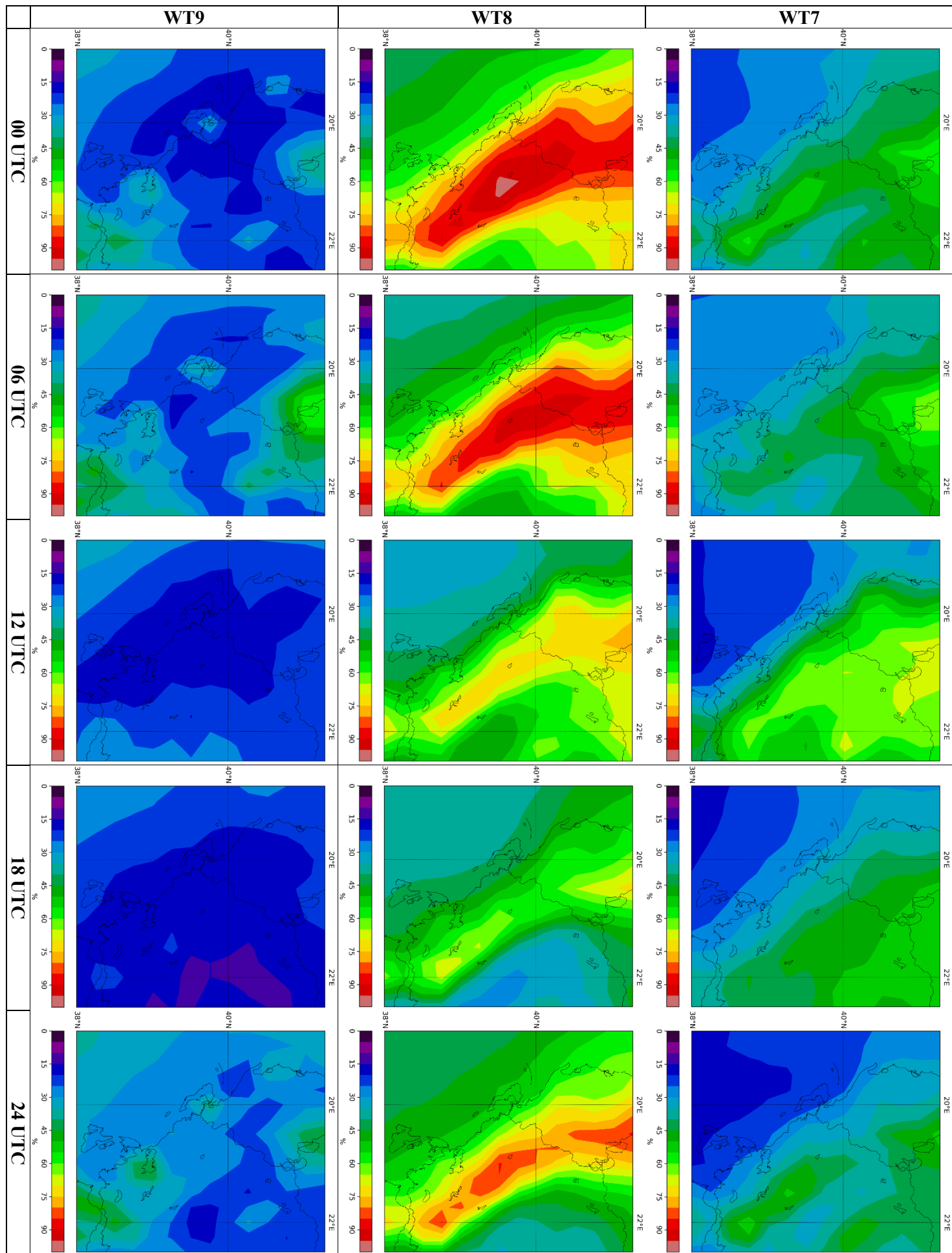
Σχήμα Δ3. Χάρτες των μέσων χωρικών κατανομών (00, 06, 12, 18, και 24 UTC) της διεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου (m/s) στα 10 μέτρα για όλους τους WTs.



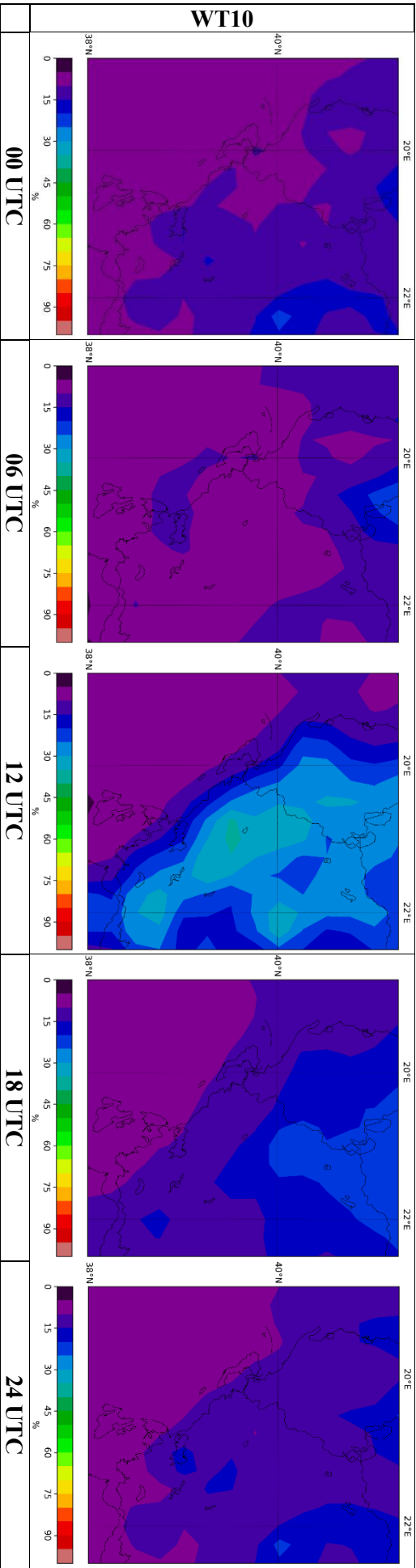
συνολική νεφοκάλυψη (%)



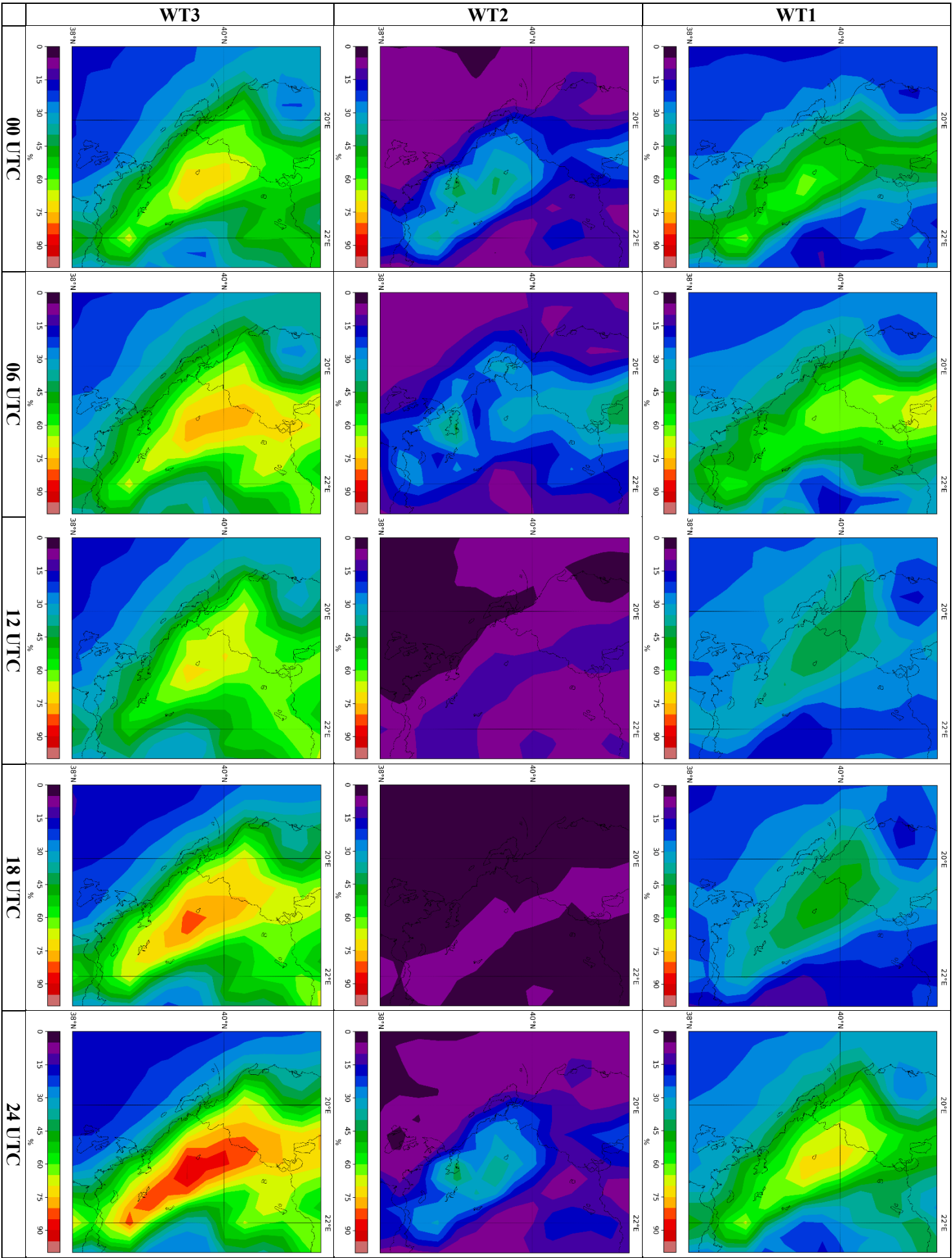
συνολική νεφοκάλυψη (%)



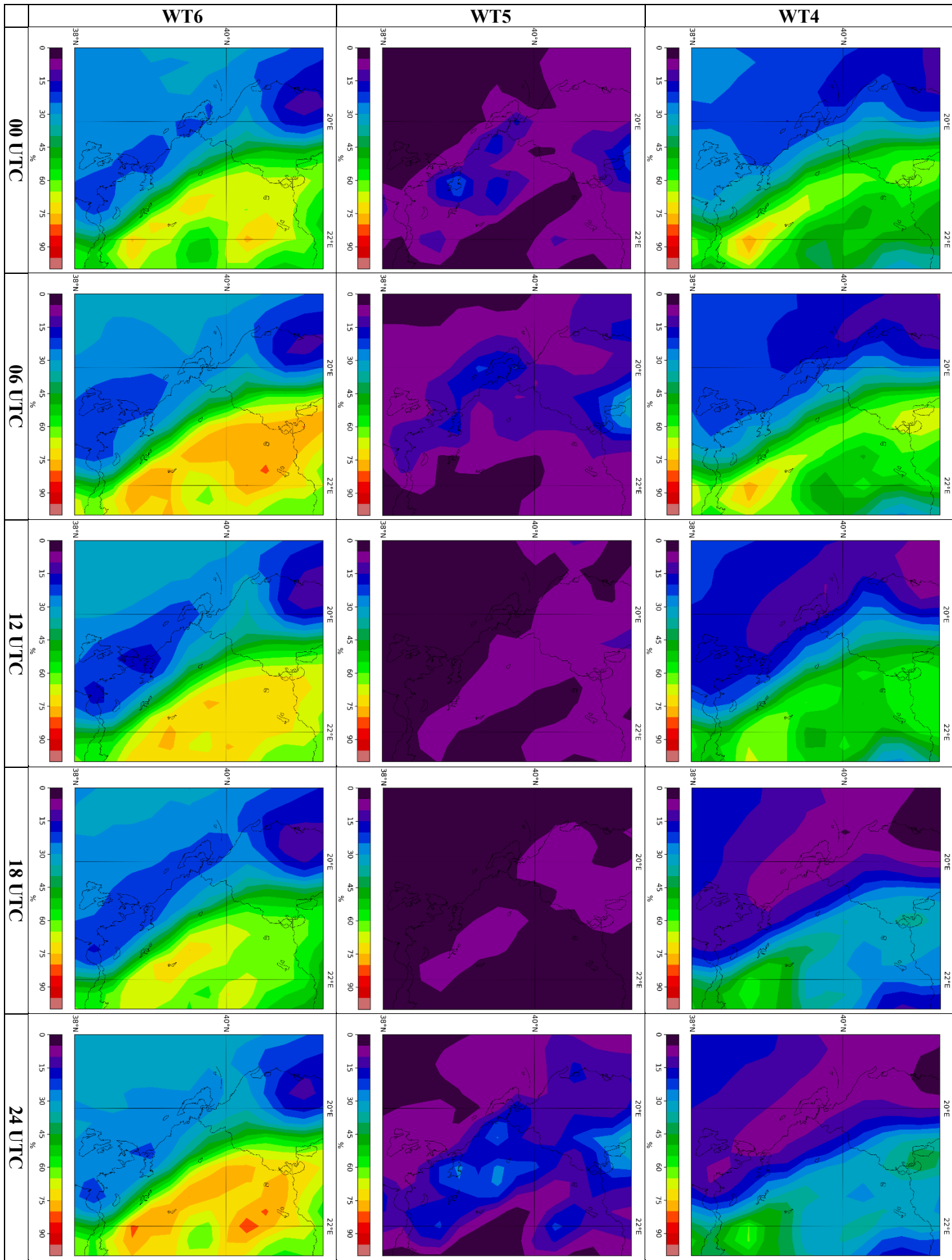
συνολική νεφοκάλυψη (%)



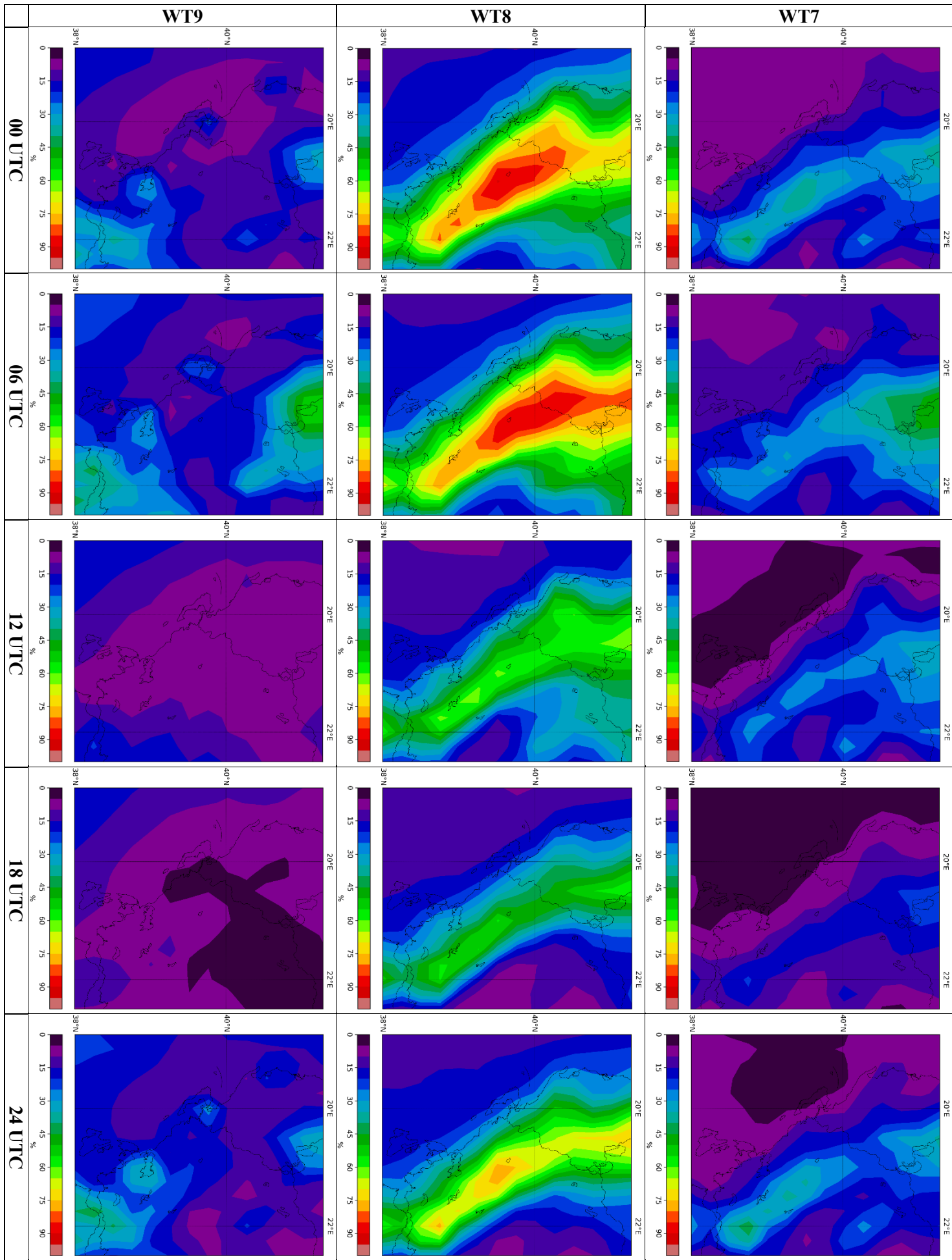
Σχήμα Α4. Χάρτες των μέσων χωρικών κατανομών (00, 06, 12, 18, και 24 UTC) της συνολικής νεφοάδωσης (%) για όλους τους WTs.



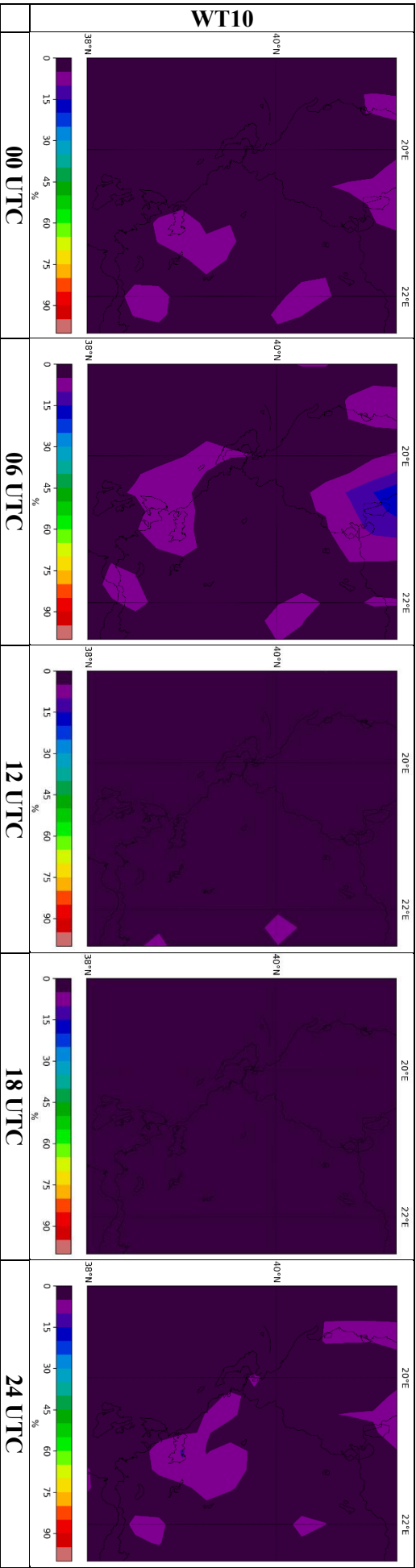
νεφοκάλυψη (%) χαμηλών νεφών



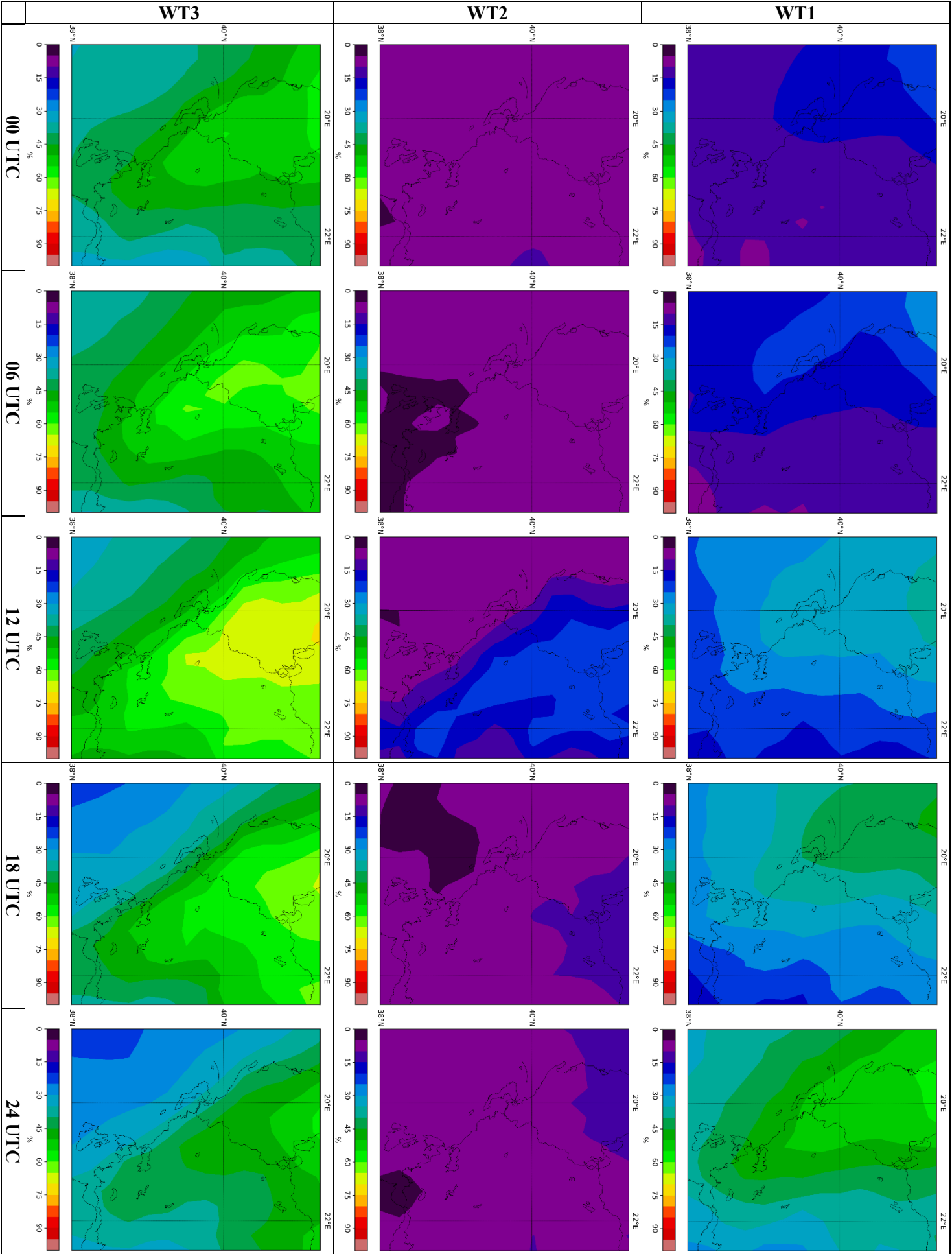
νεφοκάλυψη (%) χαμηλών νεφών



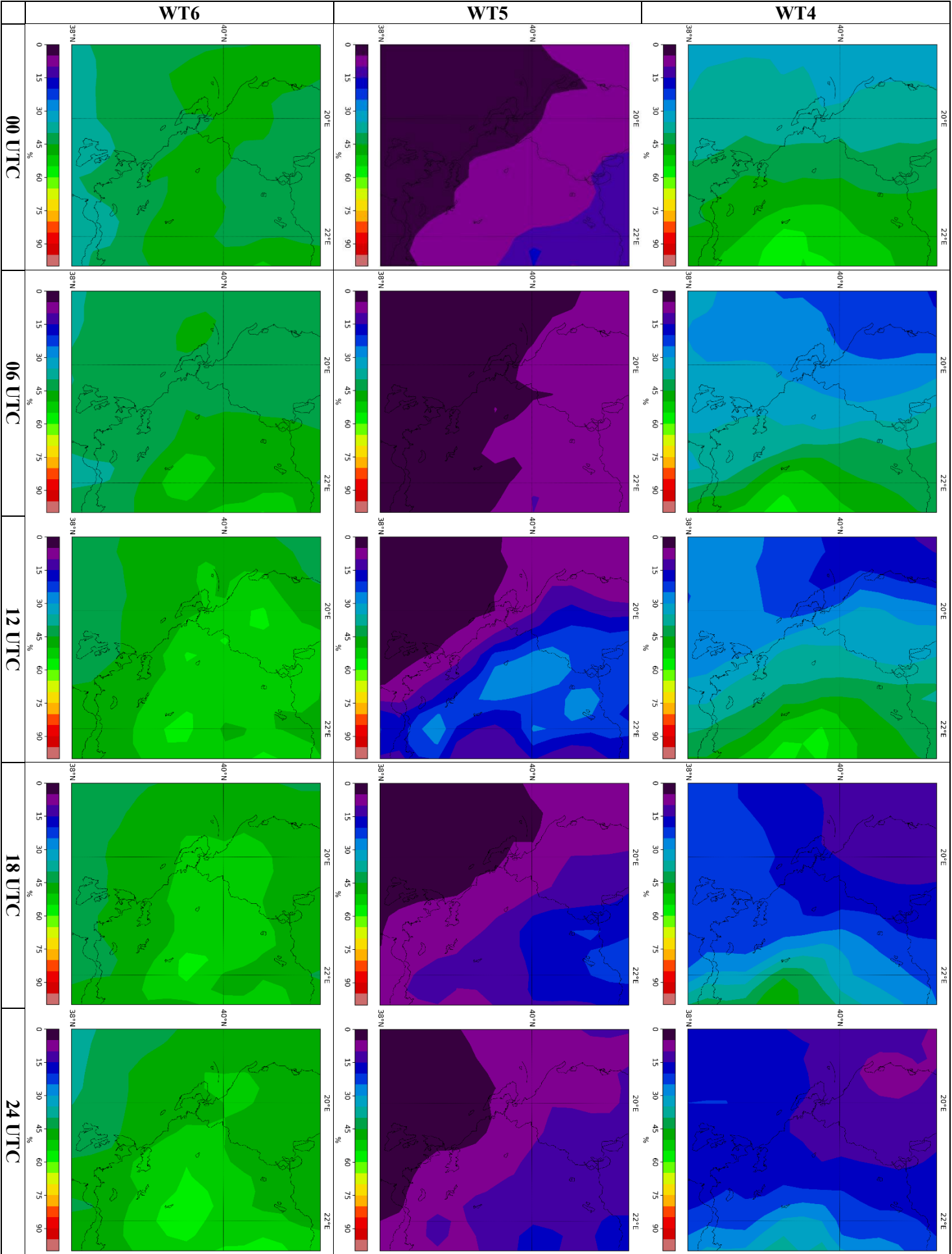
νεφοκάλυψη (%) χαμηλών νεφών



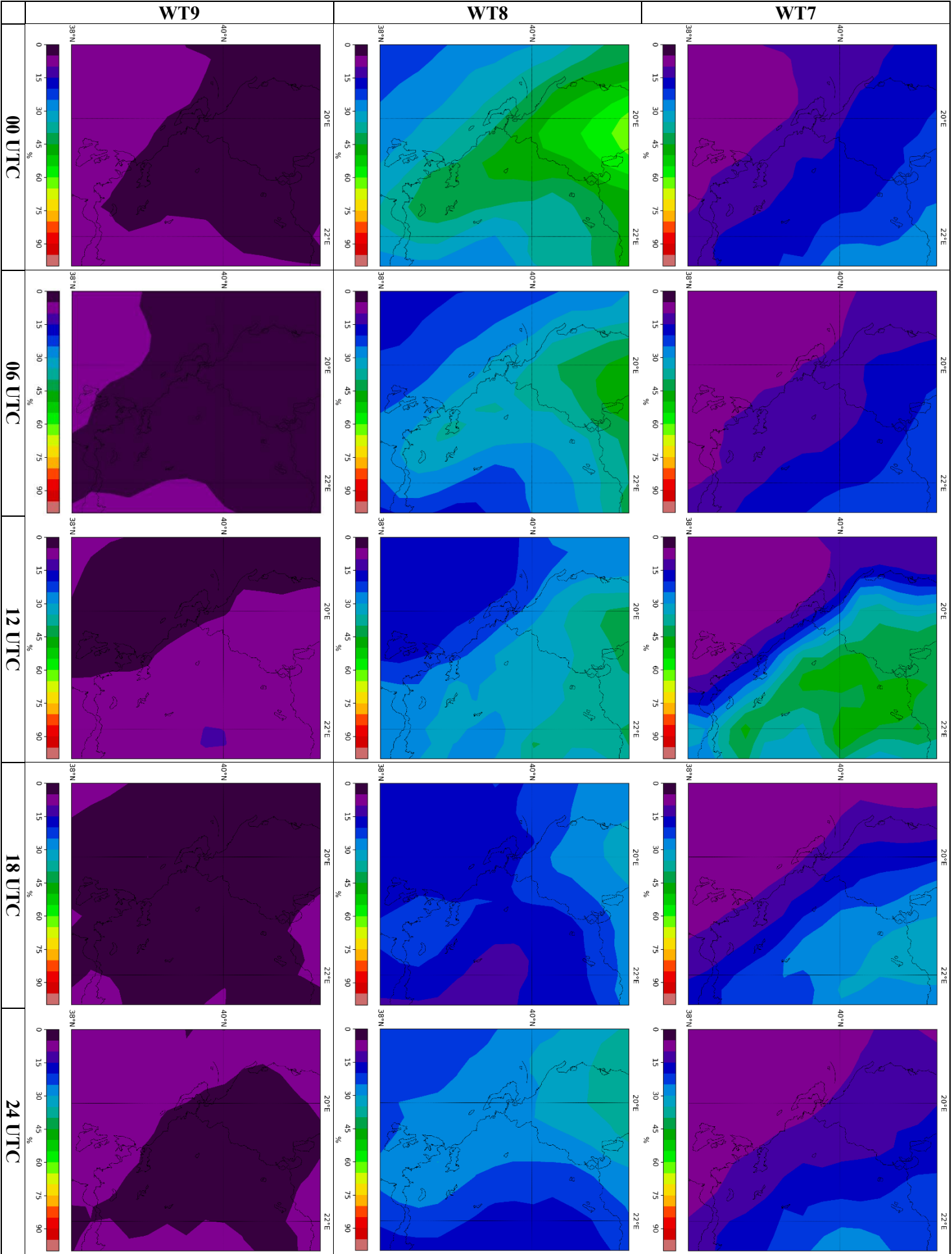
Σχήμα Α5. Χάρτες των μέσων χωρικών κατανομών (00, 06, 12, 18, και 24 UTC) της νεφοκάλυψης (%) χαμηλών νεφών για όλους τους WTs.



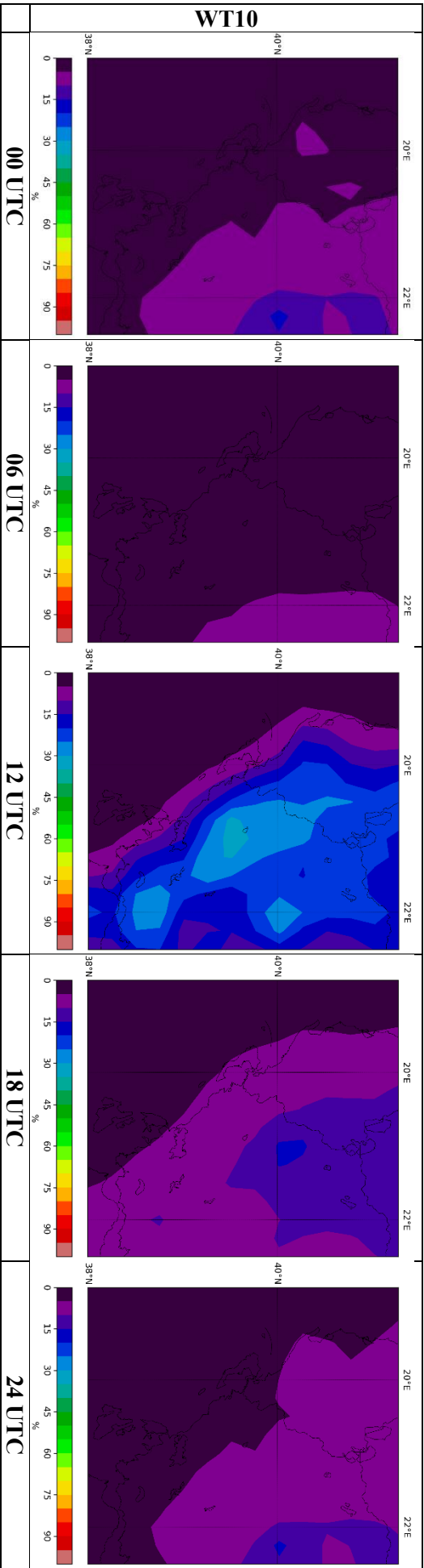
νεφοκάλυψη (%) μεσαίων νεφών



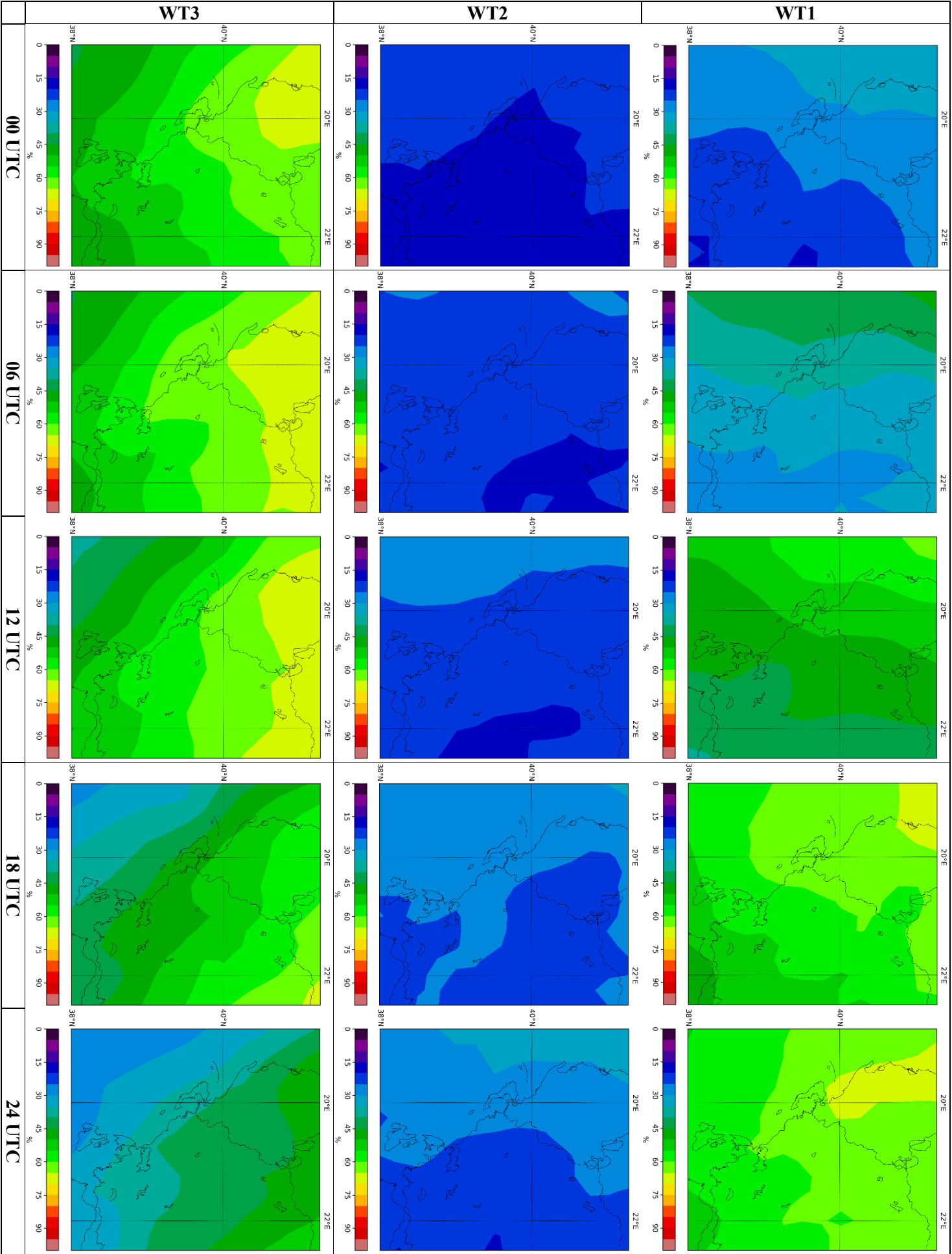
νεφοκάλυψη (%) μεσαίων νεφών



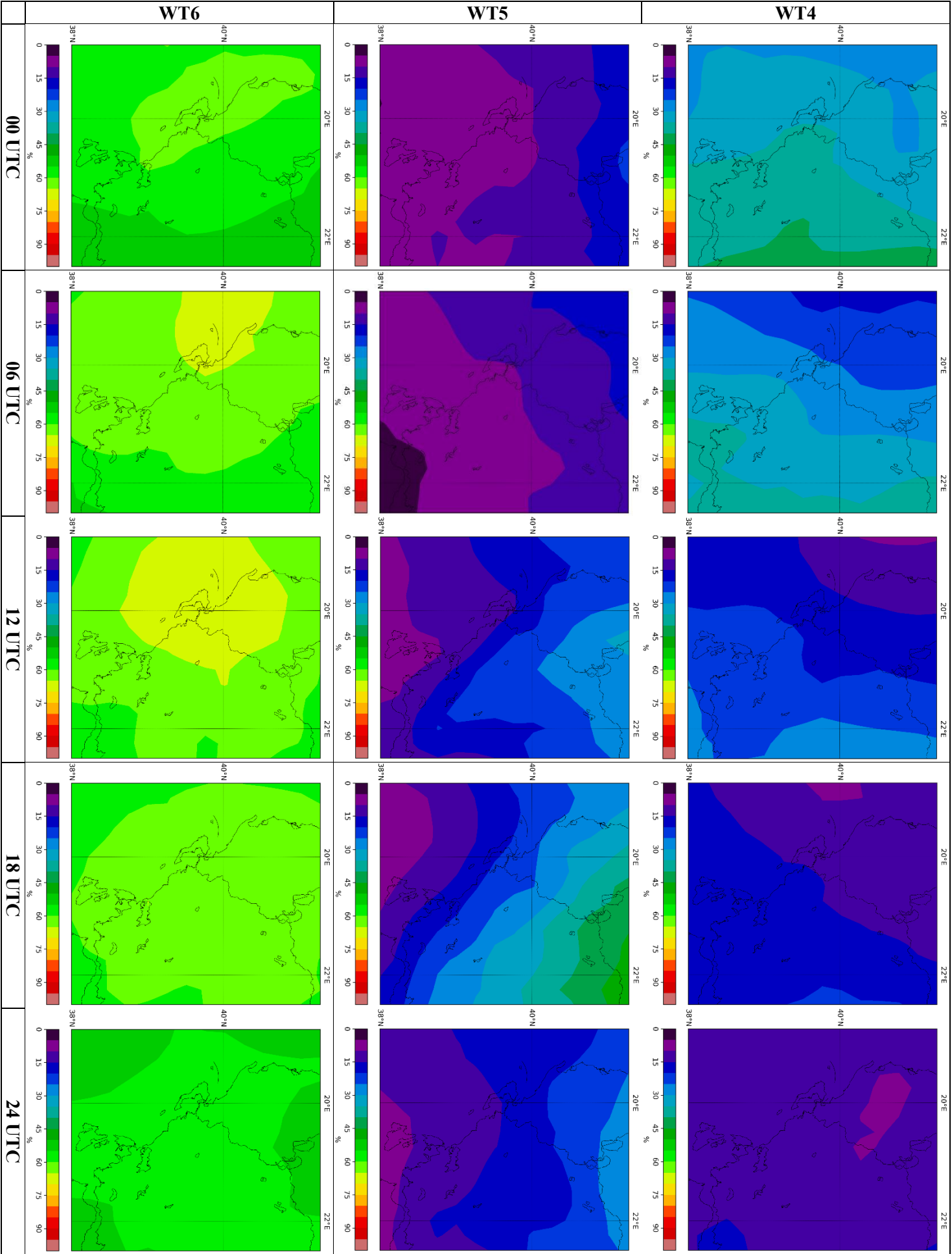
νεφοκάλυψη (%) μεσαίων νεφών



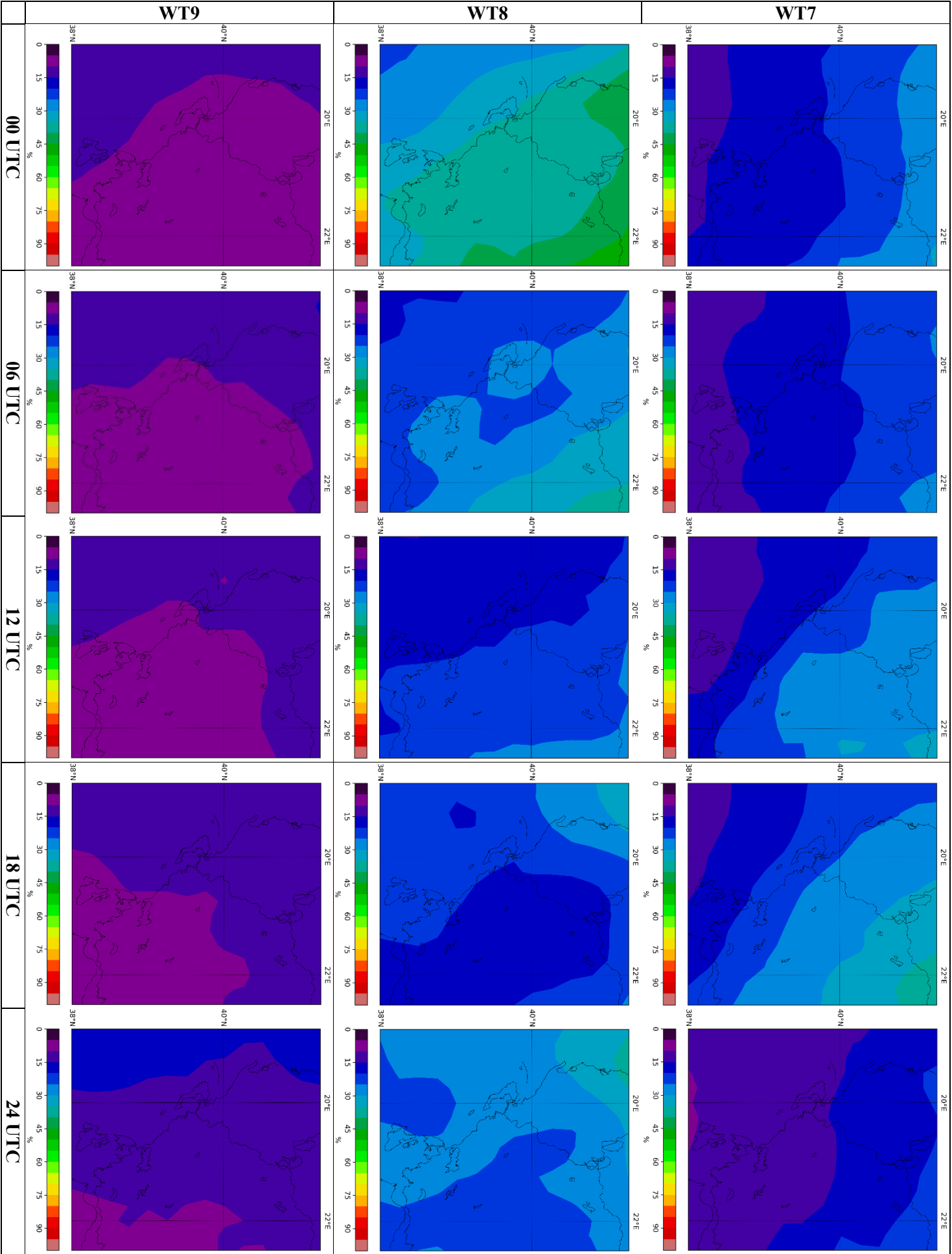
Σχήμα Δ6. Χάρτες των μέσων χωρικών κατανομών (00, 06, 12, 18, και 24 UTC) της νεφοκάλυψης (%) μεσαίων νεφών για όλους τους WTs.



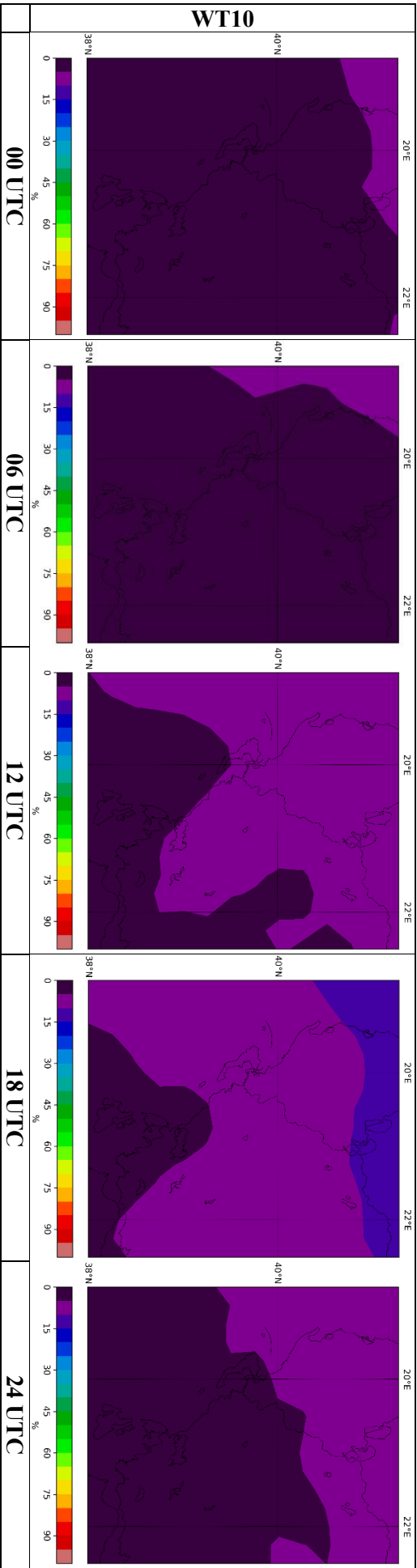
νεφοκάλυψη (%) υψηλών νεφών



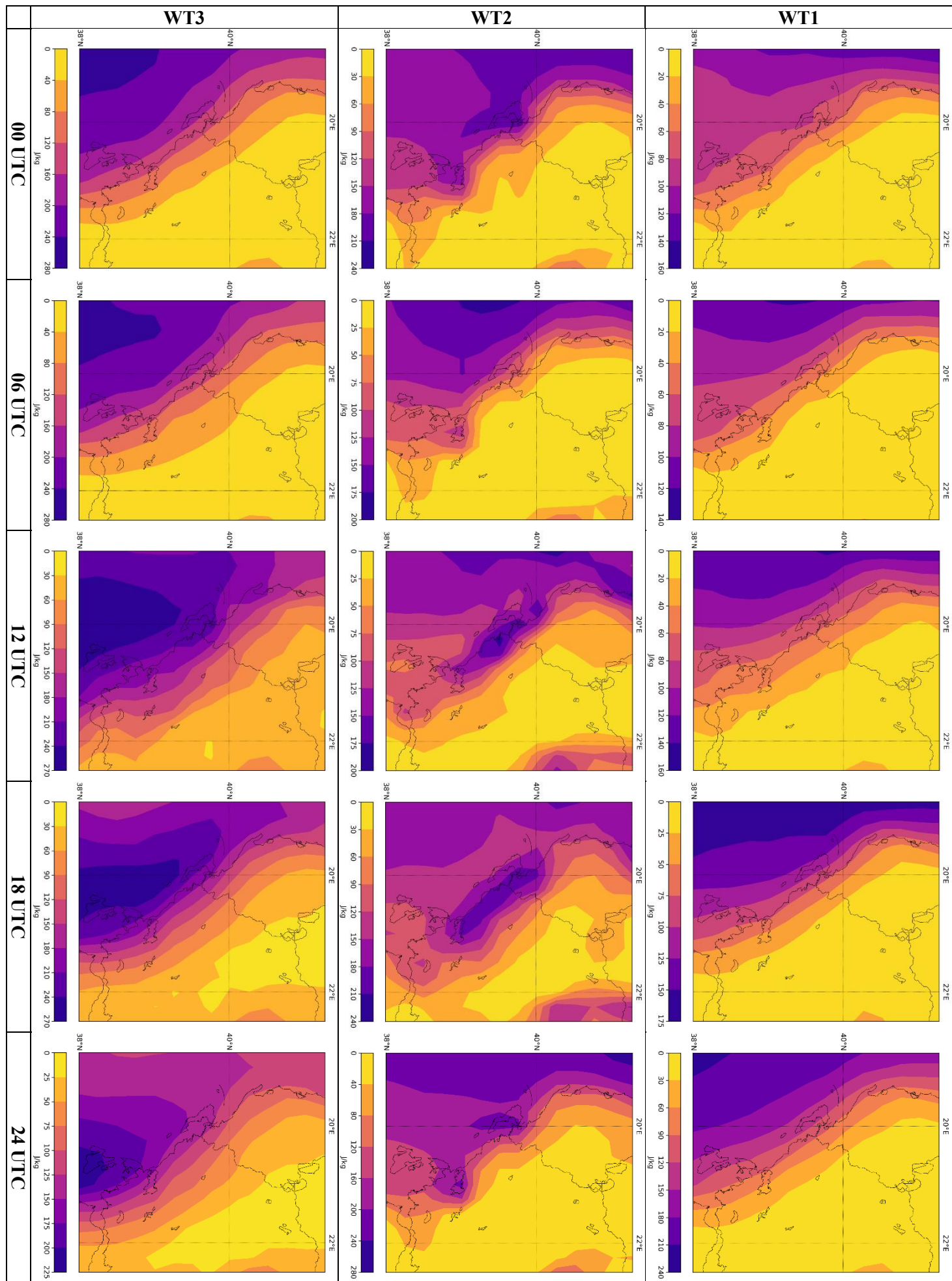
νεφοκάλυψη (%) υψηλών νεφών



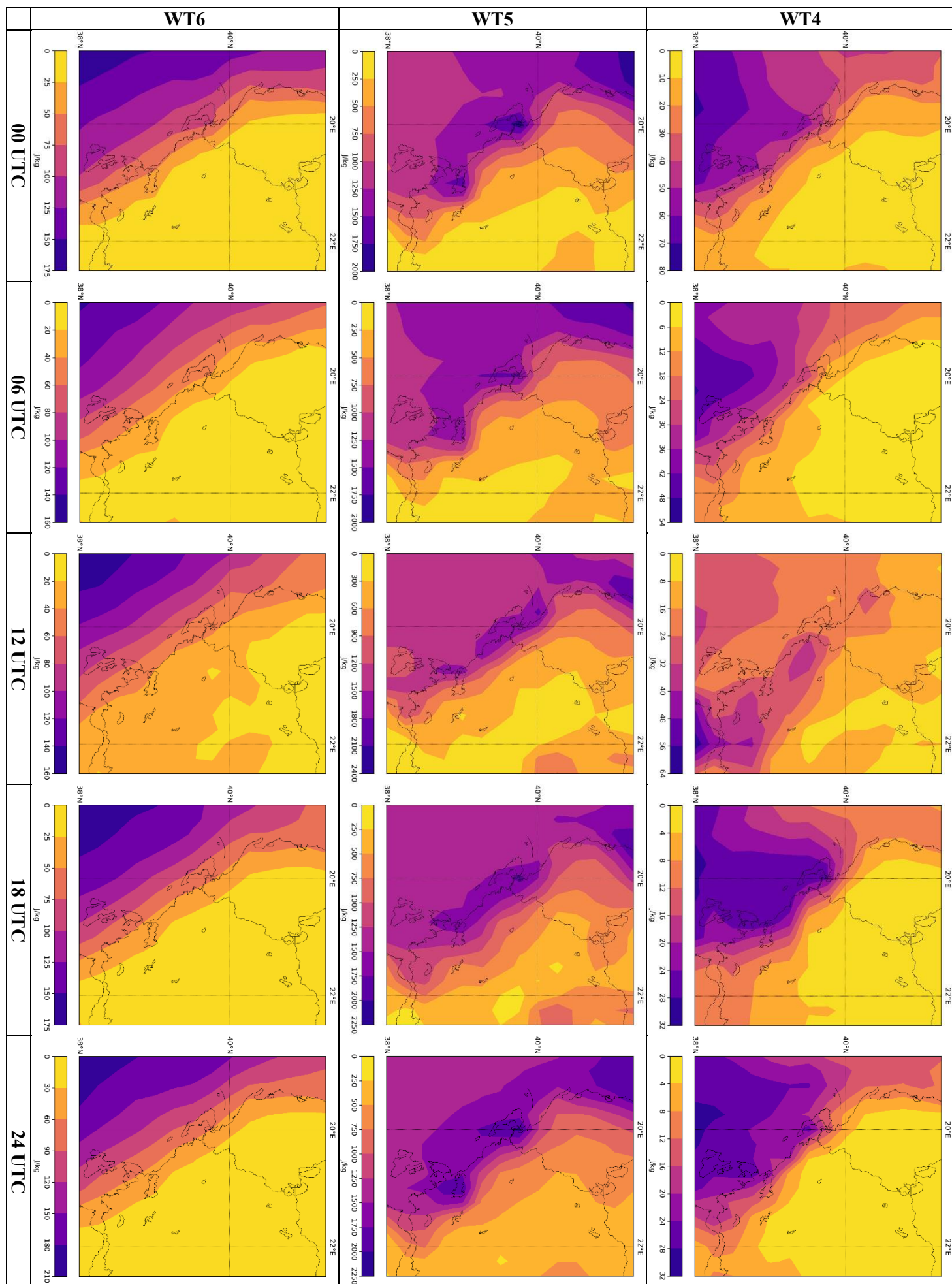
νεφοκάλυψη (%) υψηλών νεφών



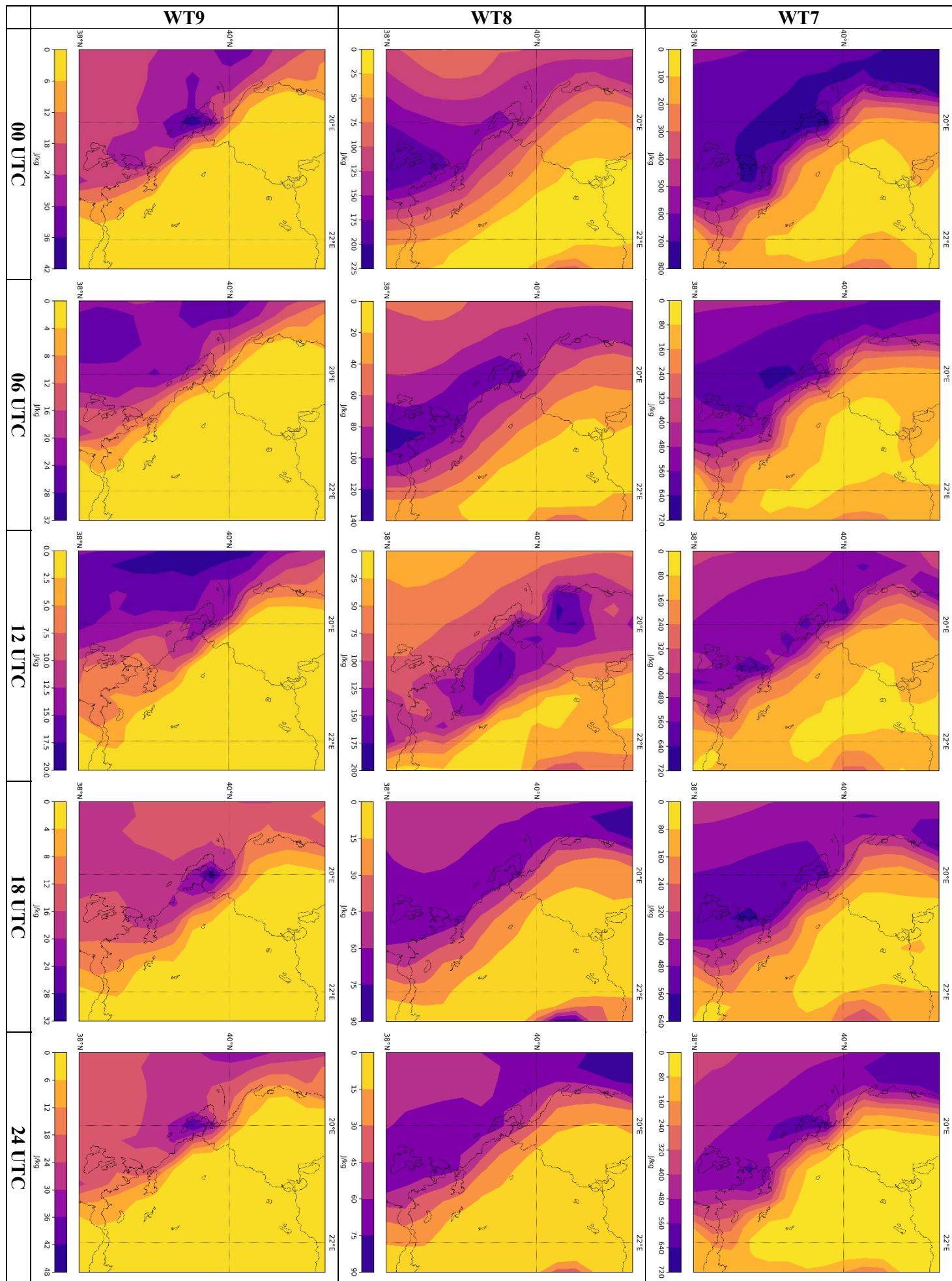
Σχήμα Δ7. Χάρτες των μέσων χωρικών κατανομών (00, 06, 12, 18, και 24 UTC) της νεφροκάλυψης (%) υψηλών νεφών για όλους τους WTs.



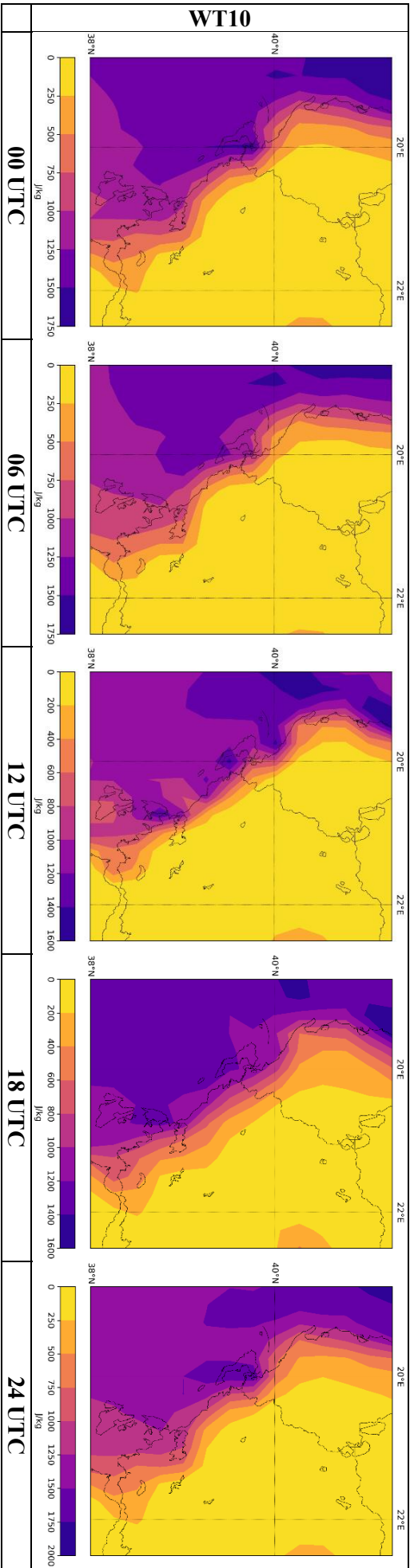
διαθέσιμη δυναμική ενέργεια ανωμεταφοράς (CAPE) (J/kg)



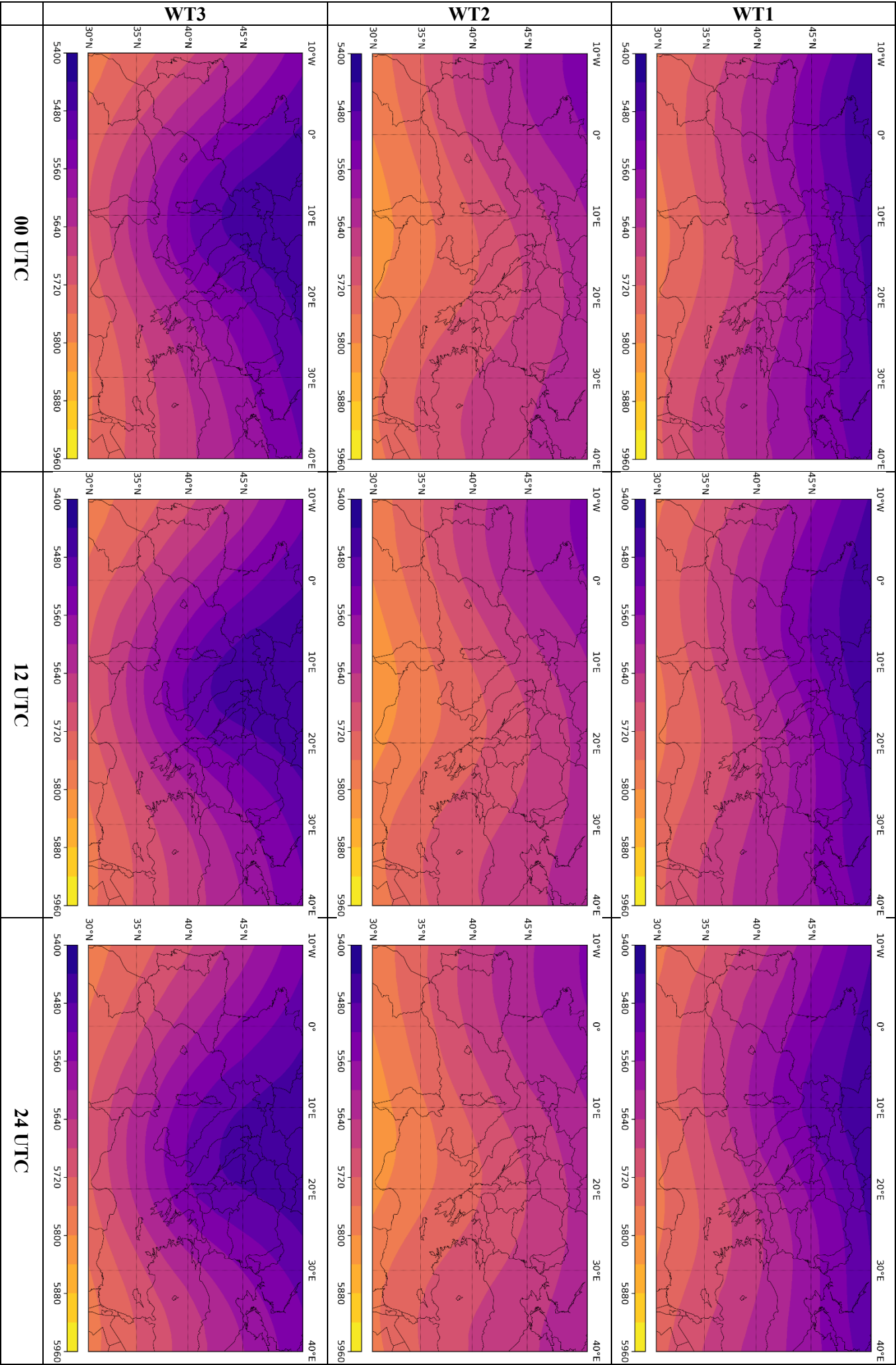
διαθέσιμη δυναμική ενέργεια ανωμεταφοράς (CAPE) (J/kg)



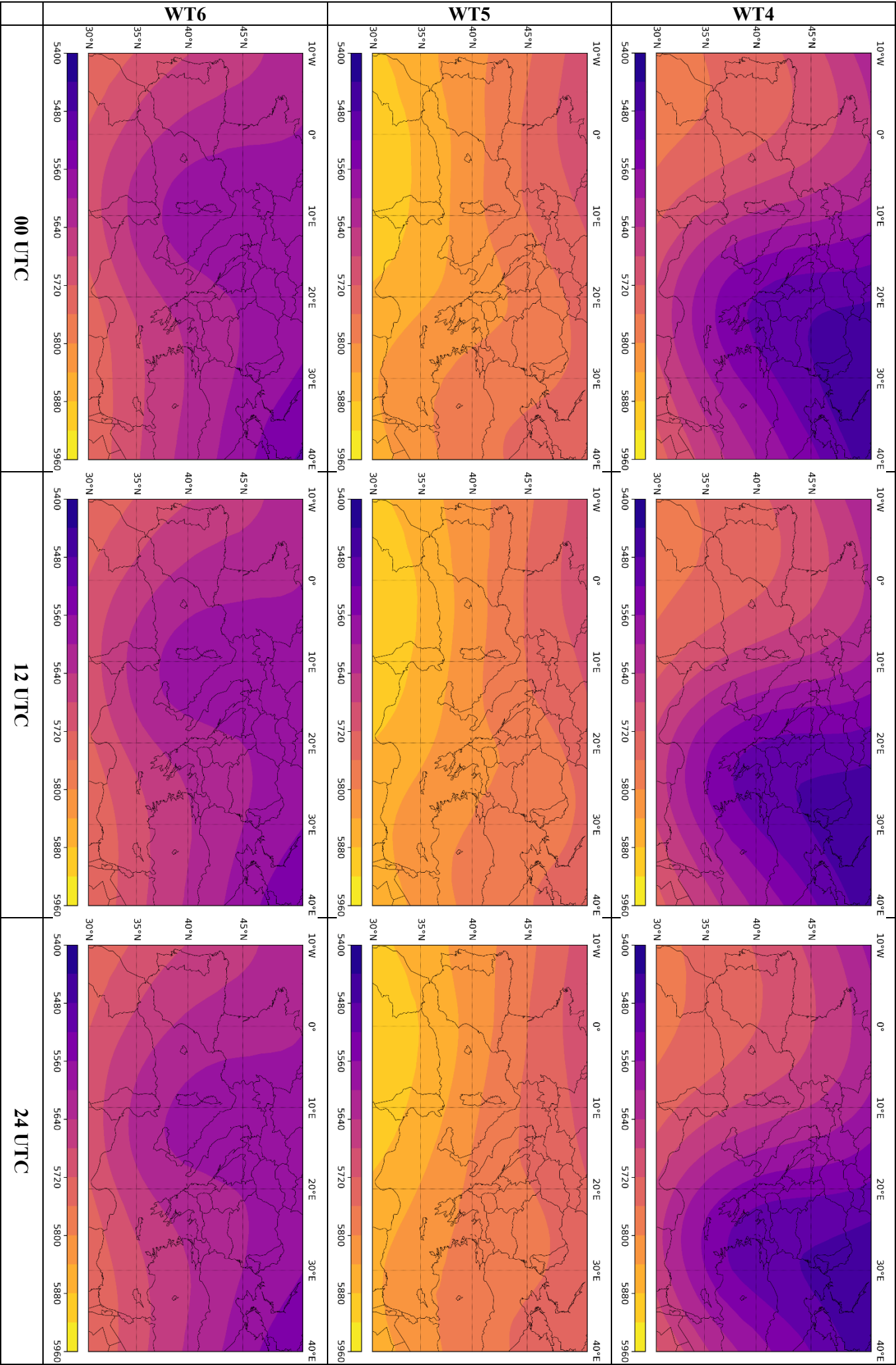
διαθέσιμη δυναμική ενέργεια ανωμεταφοράς (CAPE) (J/kg)



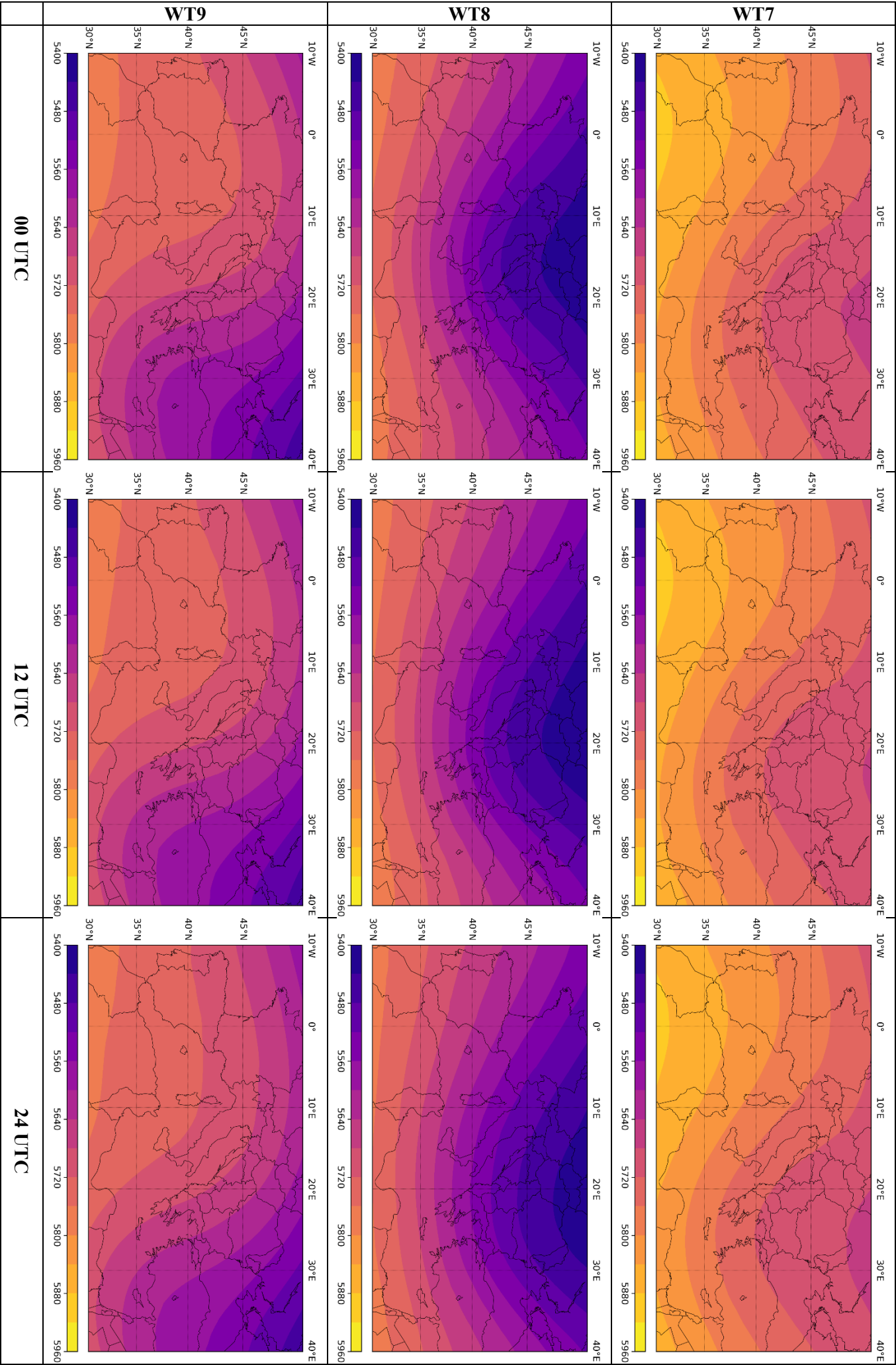
Σχήμα Α8. Χάρτες των μέσων χωρικών κατανομών (00, 06, 12, 18, και 24 UTC) της διαθέσιμης δυναμικής ενέργειας ανωματεταροδός (CAPE) (J/kg) για όλους τους WTs.



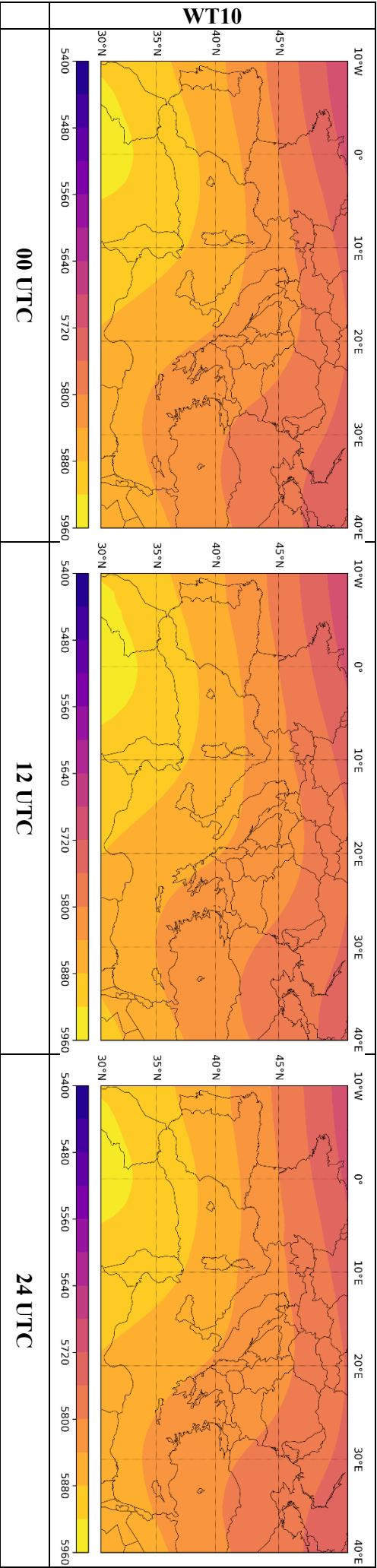
γεωδυναμικό ύψος (gpm) των 500 hPa



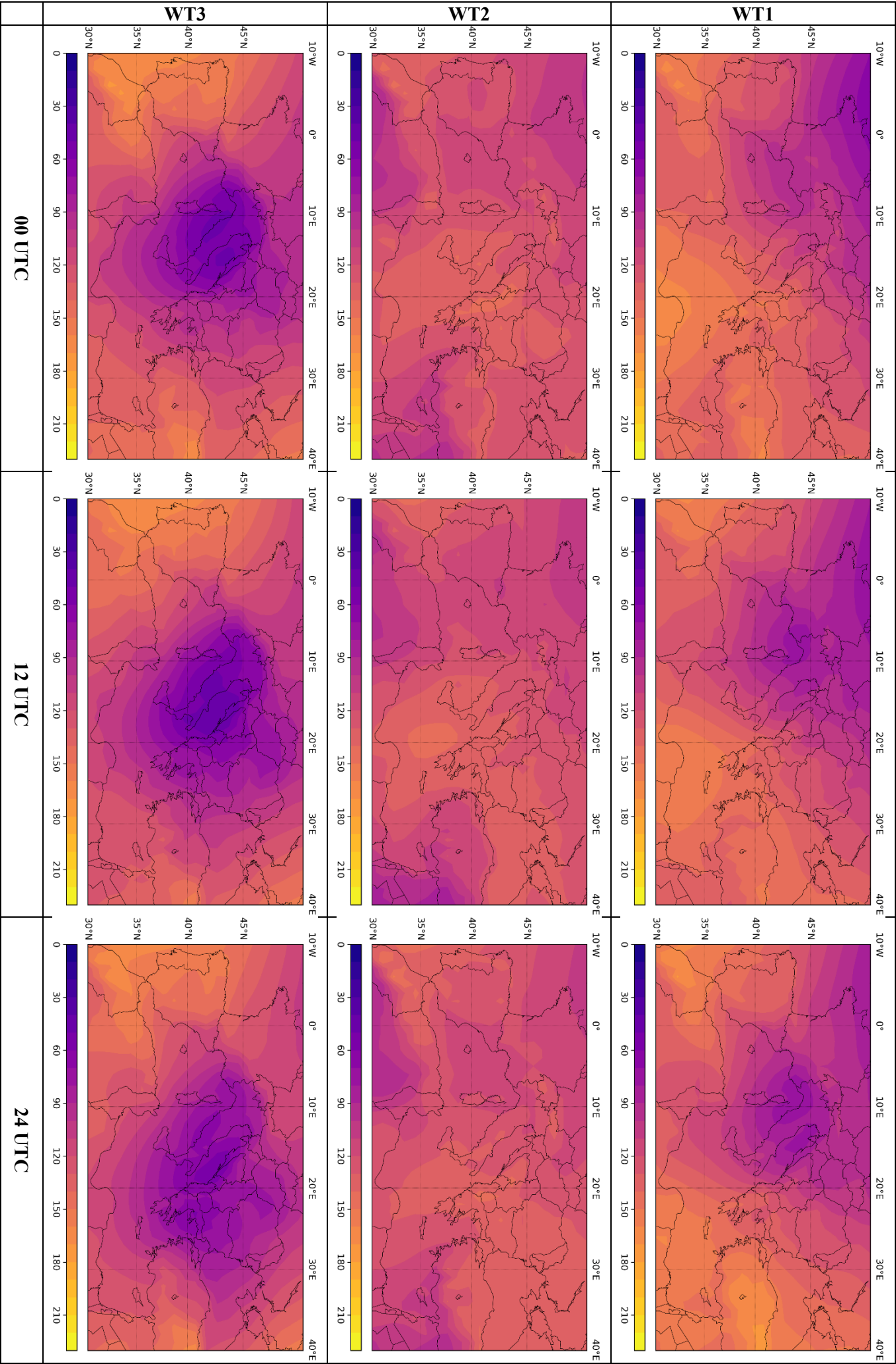
γεωδυναμικό ύψος (gpm) των 500 hPa



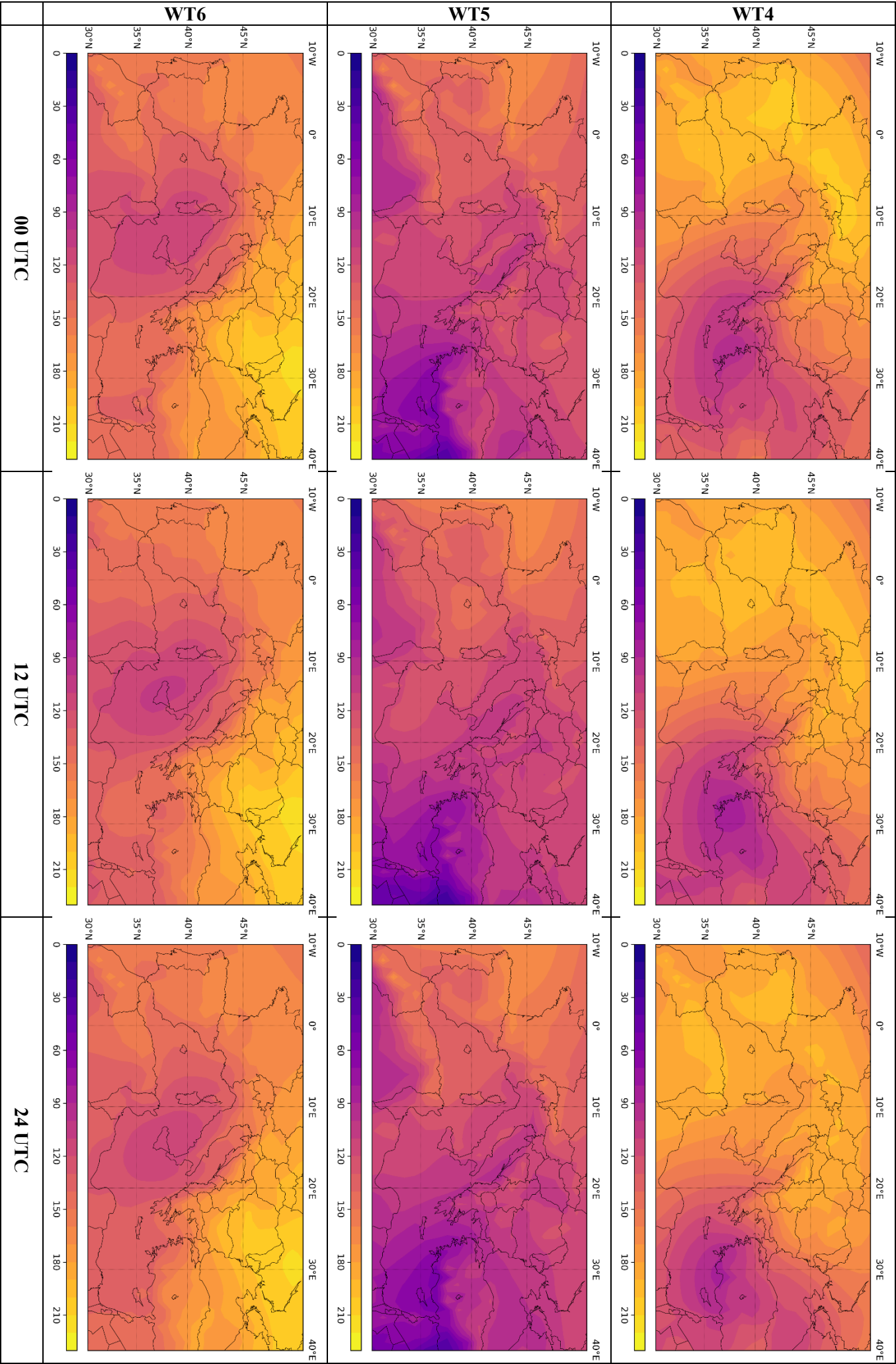
γεωδυναμικό ύψος (gpm) των 500 hPa



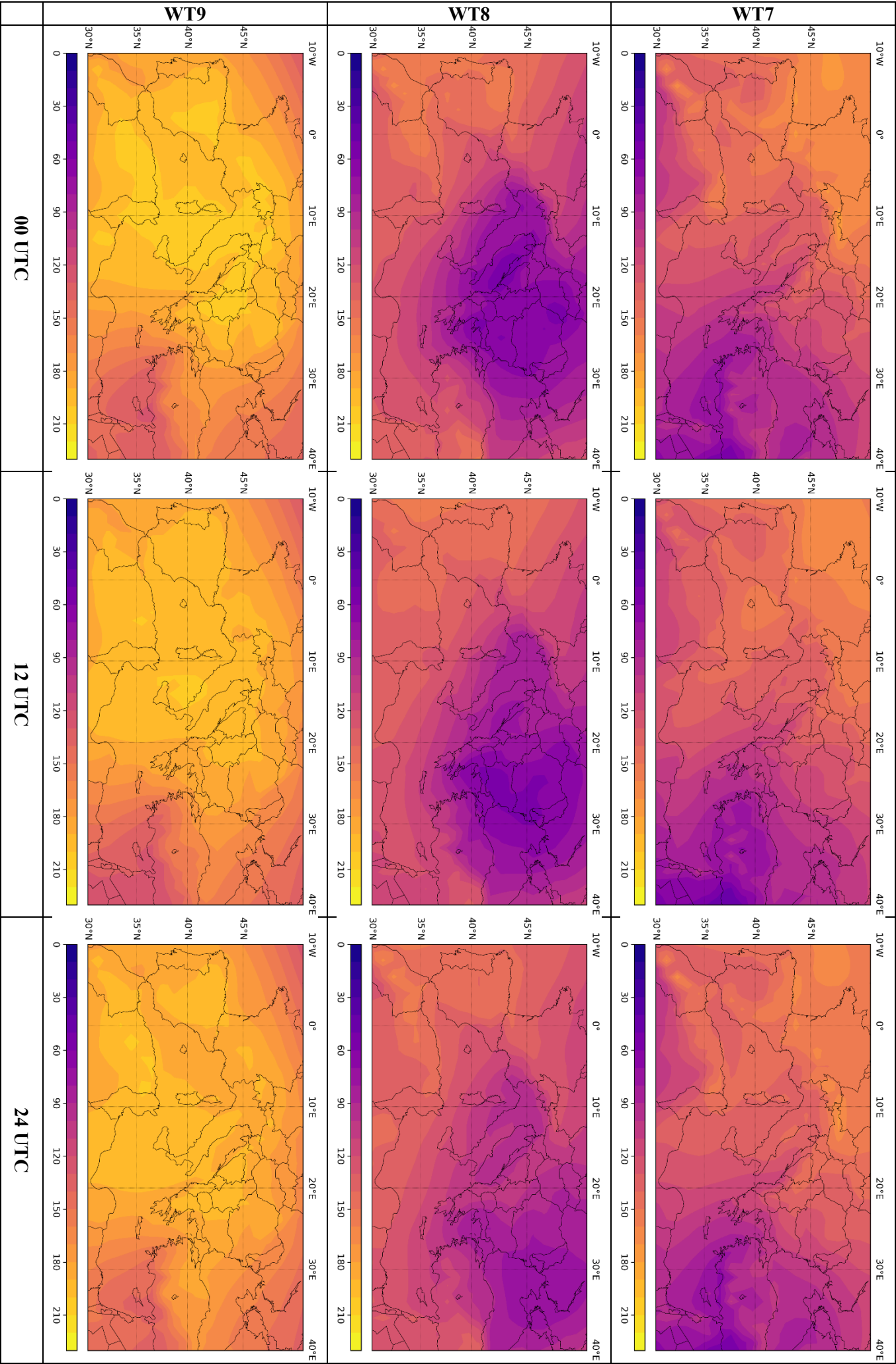
Σχήμα Α9. Χάρτες των μέσων χωρικών κατανομών (00, 12, και 24 UTC) του γεωδυναμικού ύψους (gpm) των 500 hPa για όλους τους WTs.



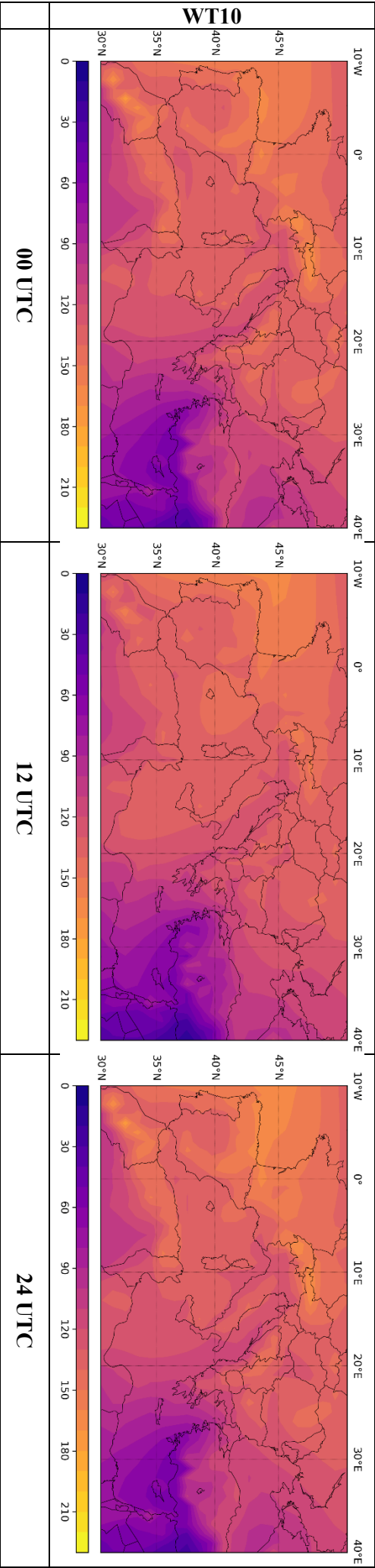
γεωδυναμικό ύψος (gpm) των 1000 hPa



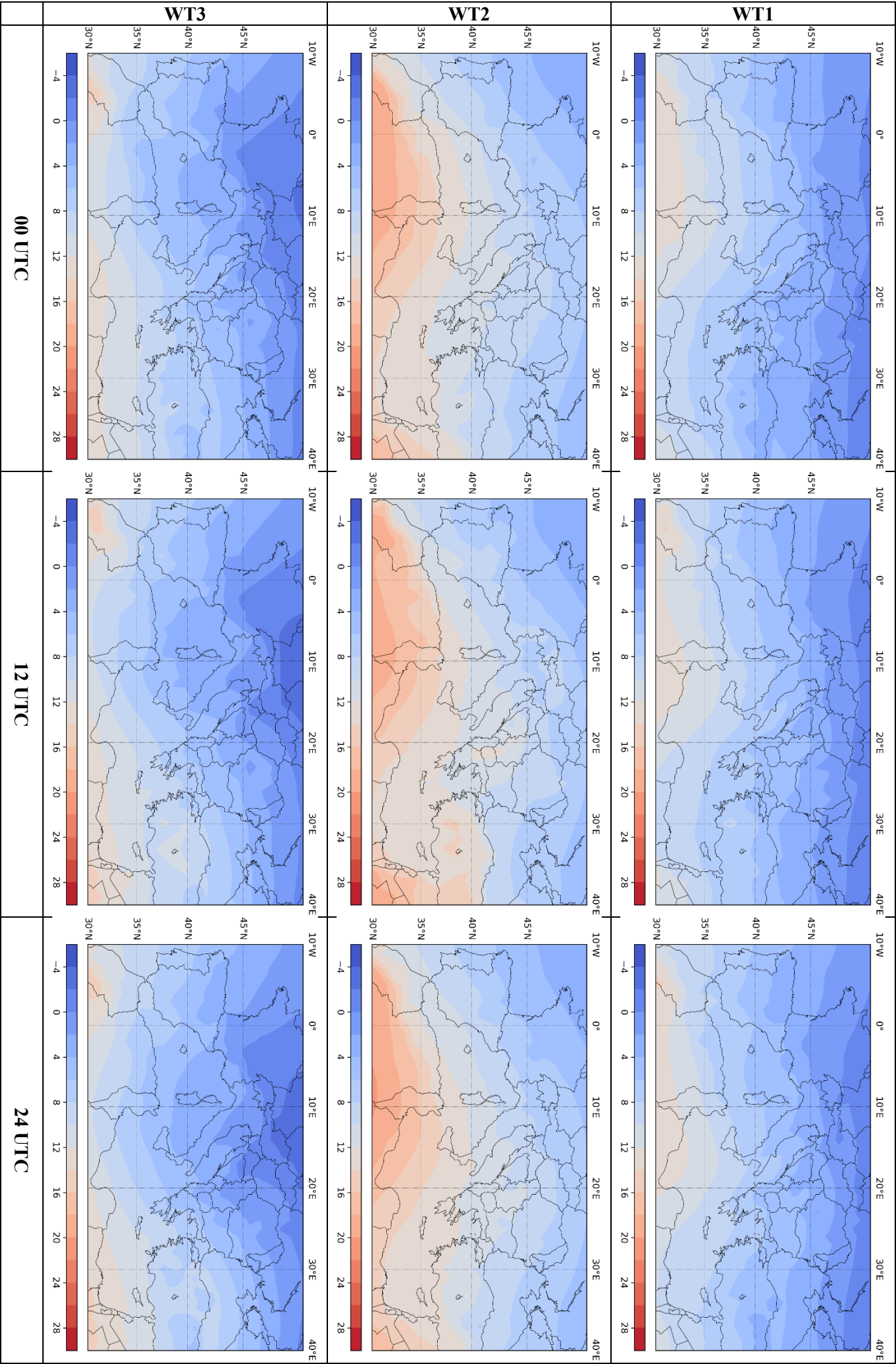
γεωδυναμικό ύψος (gpm) των 1000 hPa



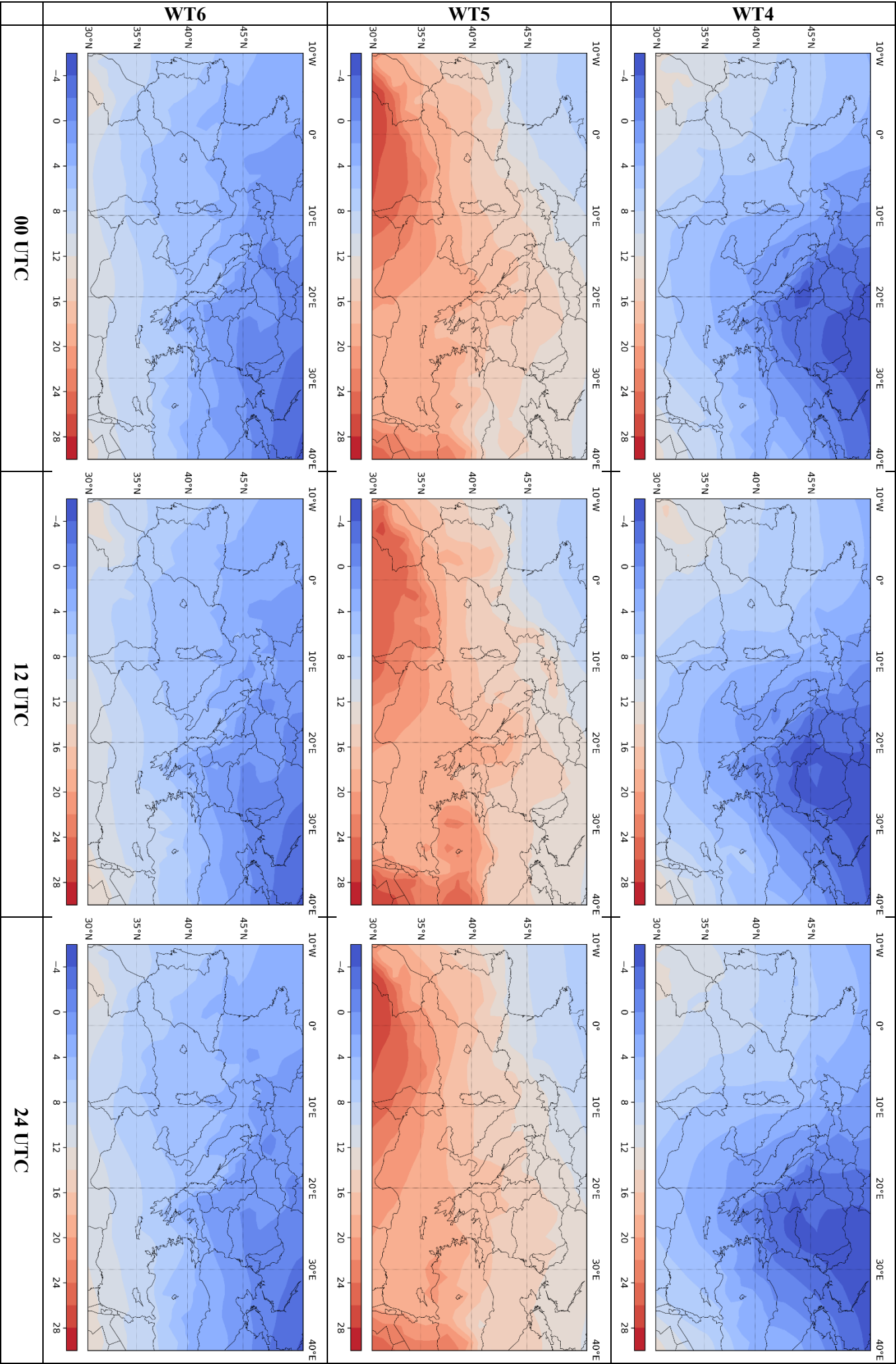
γεωδυναμικό ύψος (gpm) των 1000 hPa



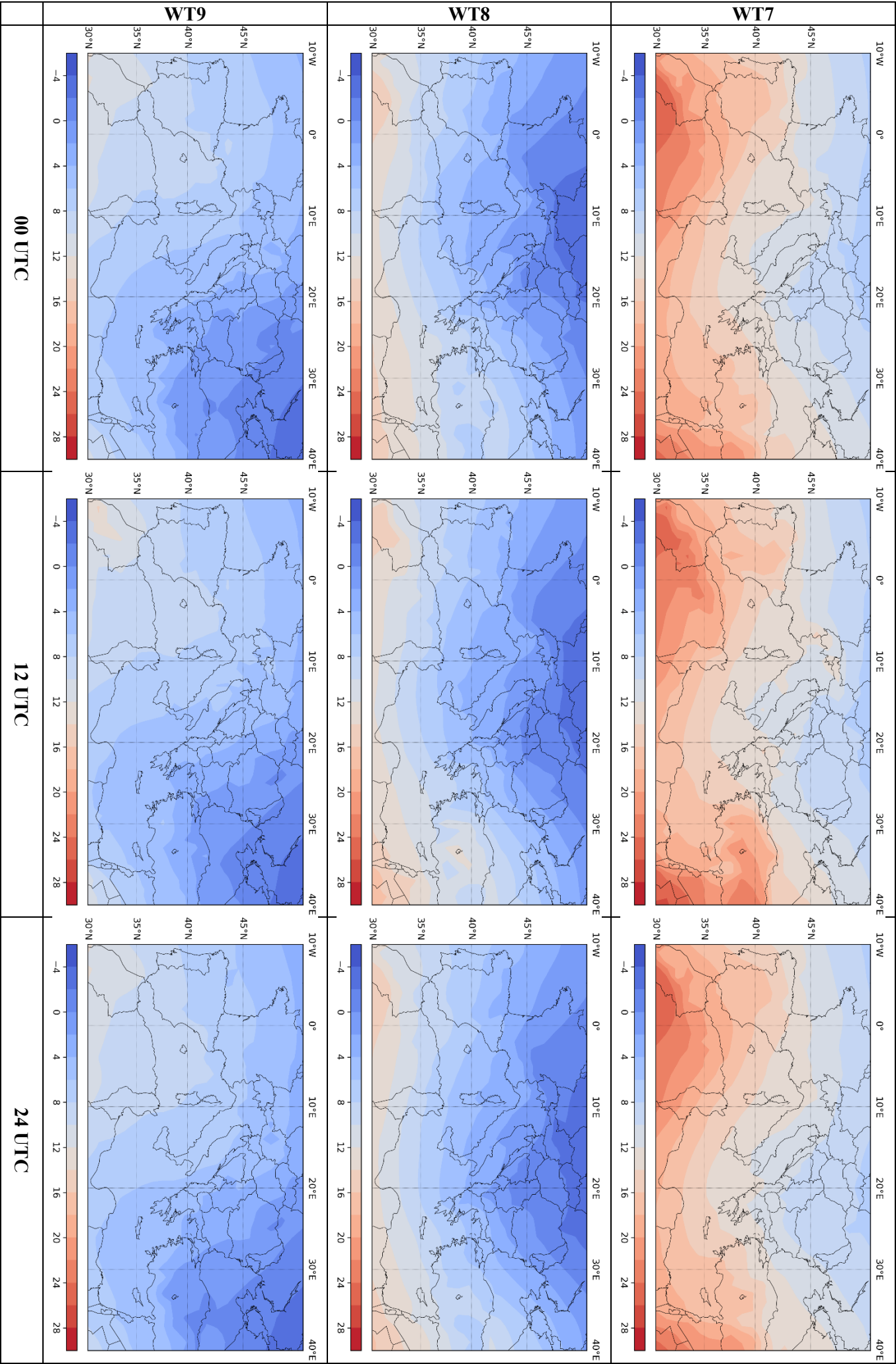
Σχήμα Α10. Χάρτες των μέσων χωρικών κατανομών (00, 12, και 24 UTC) του γεωδυναμικού ύψους (gpm) των 1000 hPa για όλους τους WTs.



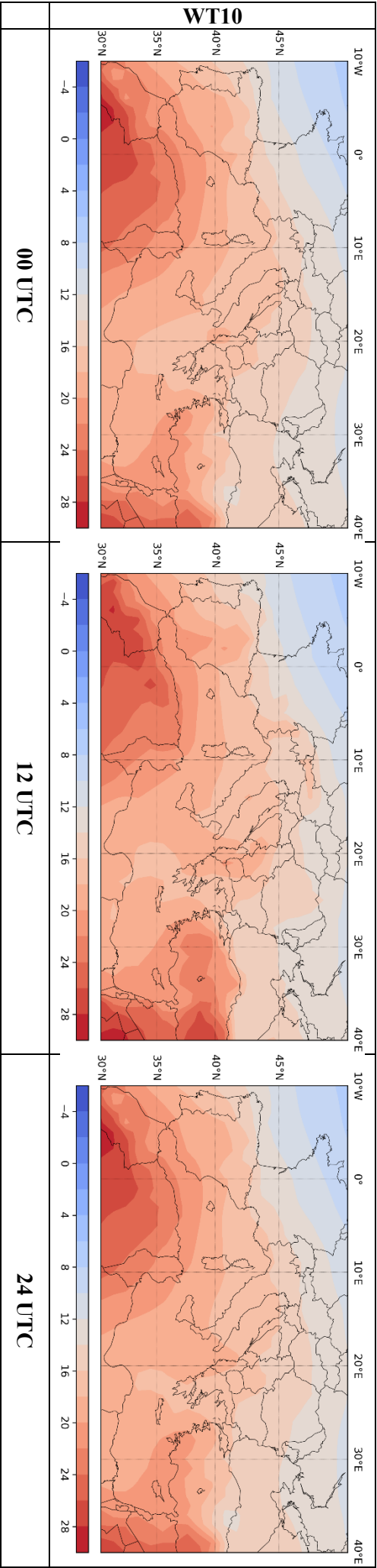
θερμοκρασία (°C) στα 850 hPa
[160]



θερμοκρασία (°C) στα 850 hPa
[161]

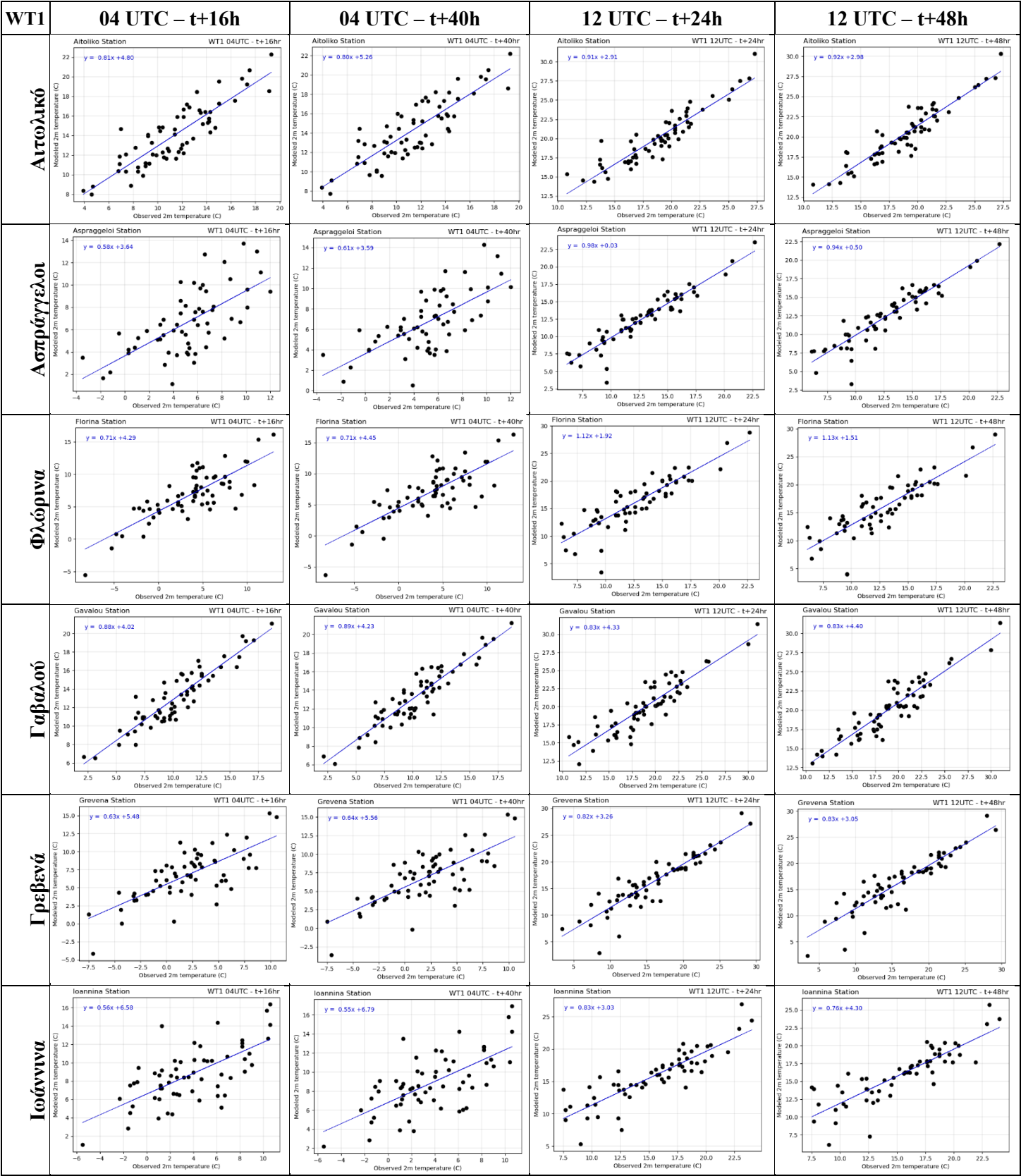


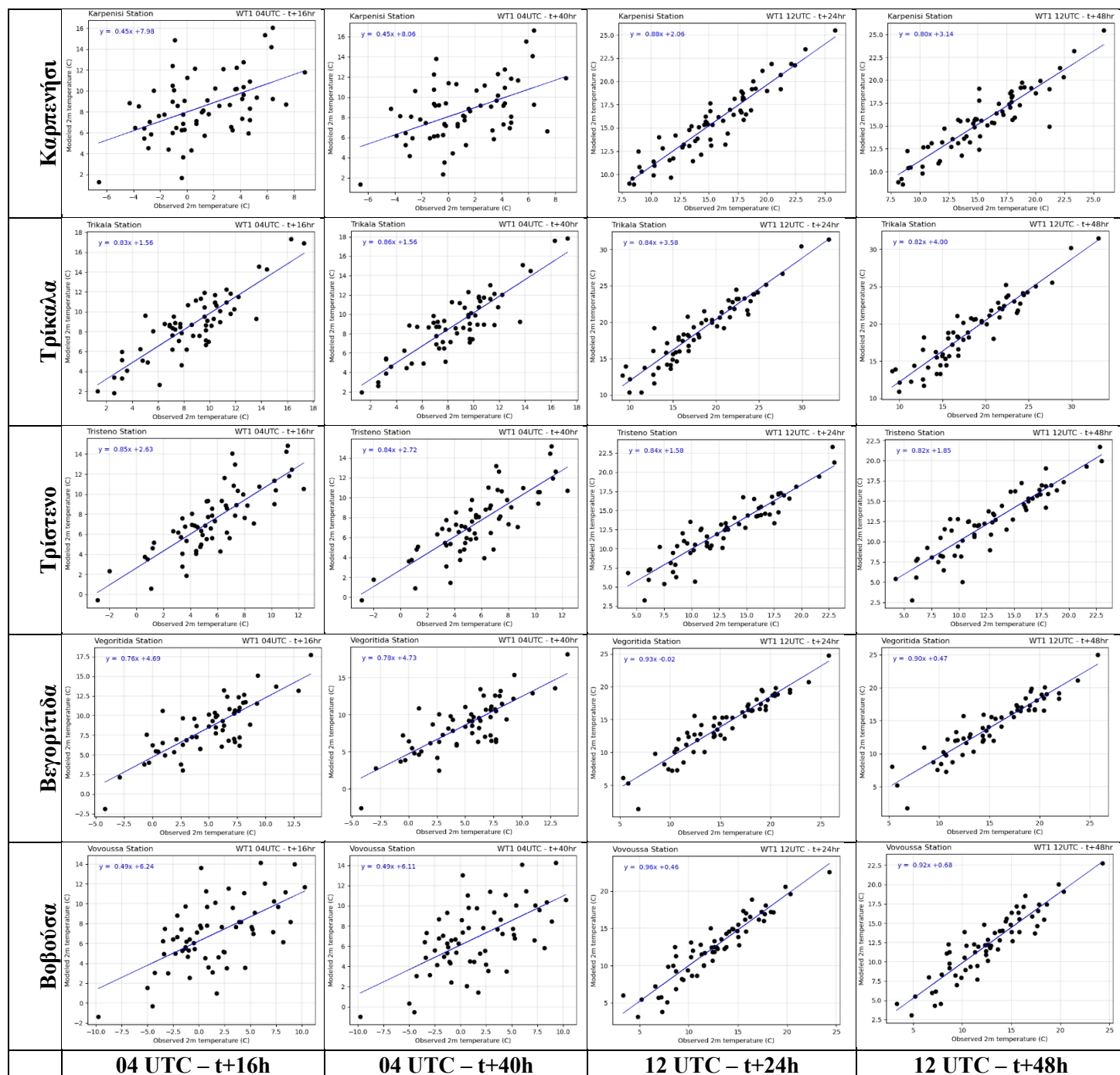
θερμοκρασία (°C) στα 850 hPa
[162]



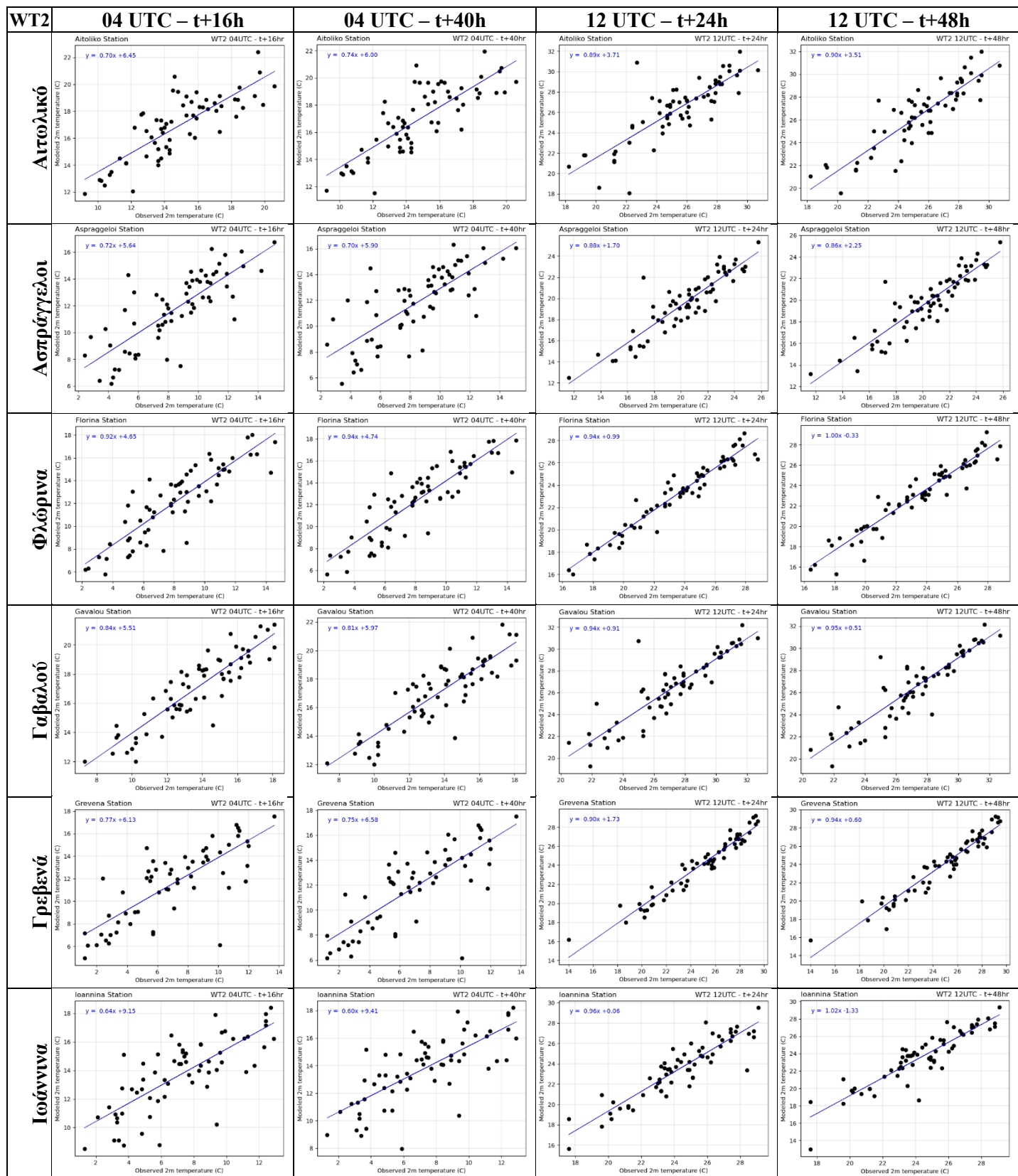
Σχήμα Α11. Χάρτες των μέσων χωρικών κατανομών (00, 12, και 24 UTC) της θερμοκρασίας (°C) στα 850 hPa για όλους τους WTs.

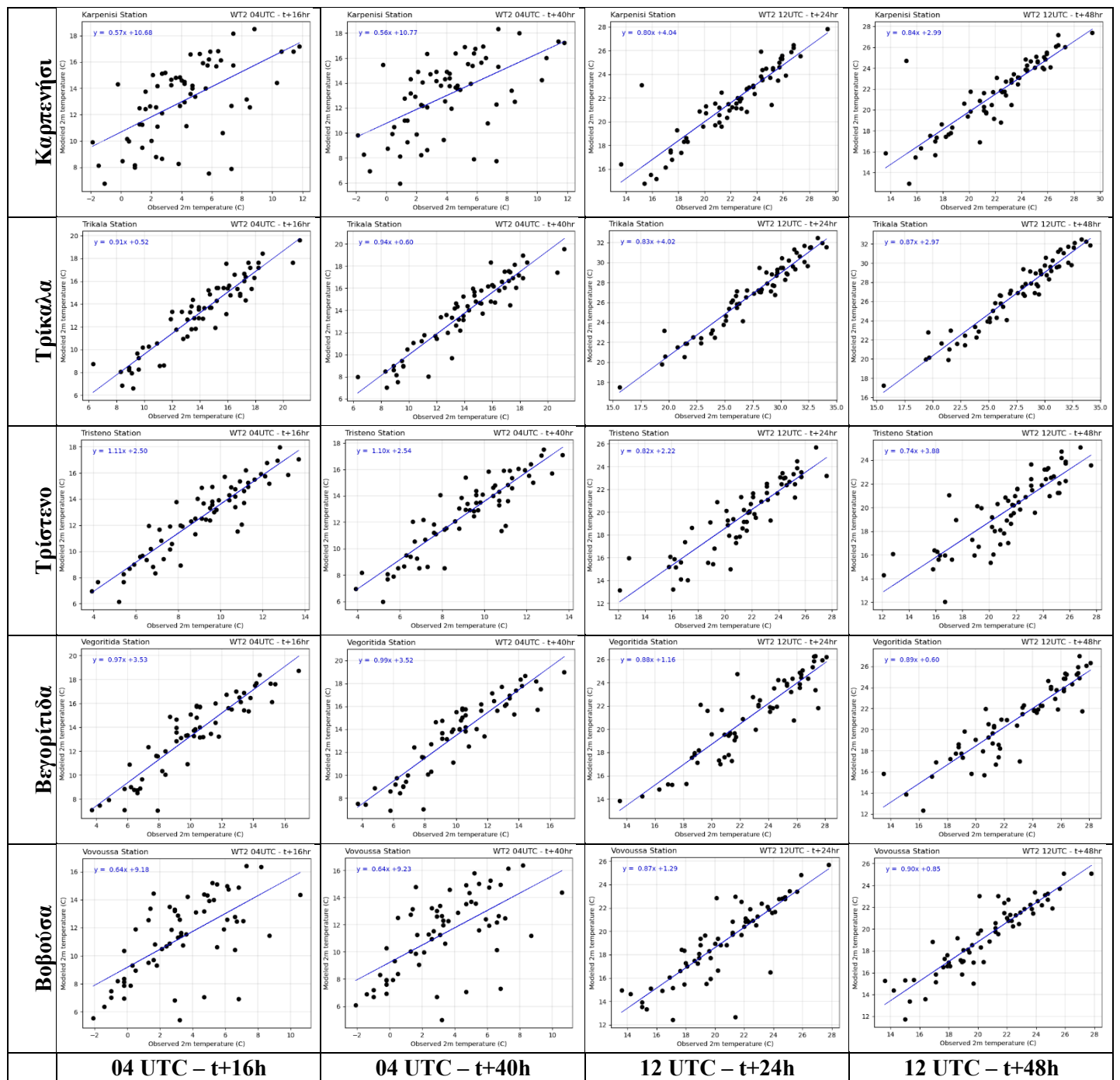
Παράρτημα Β



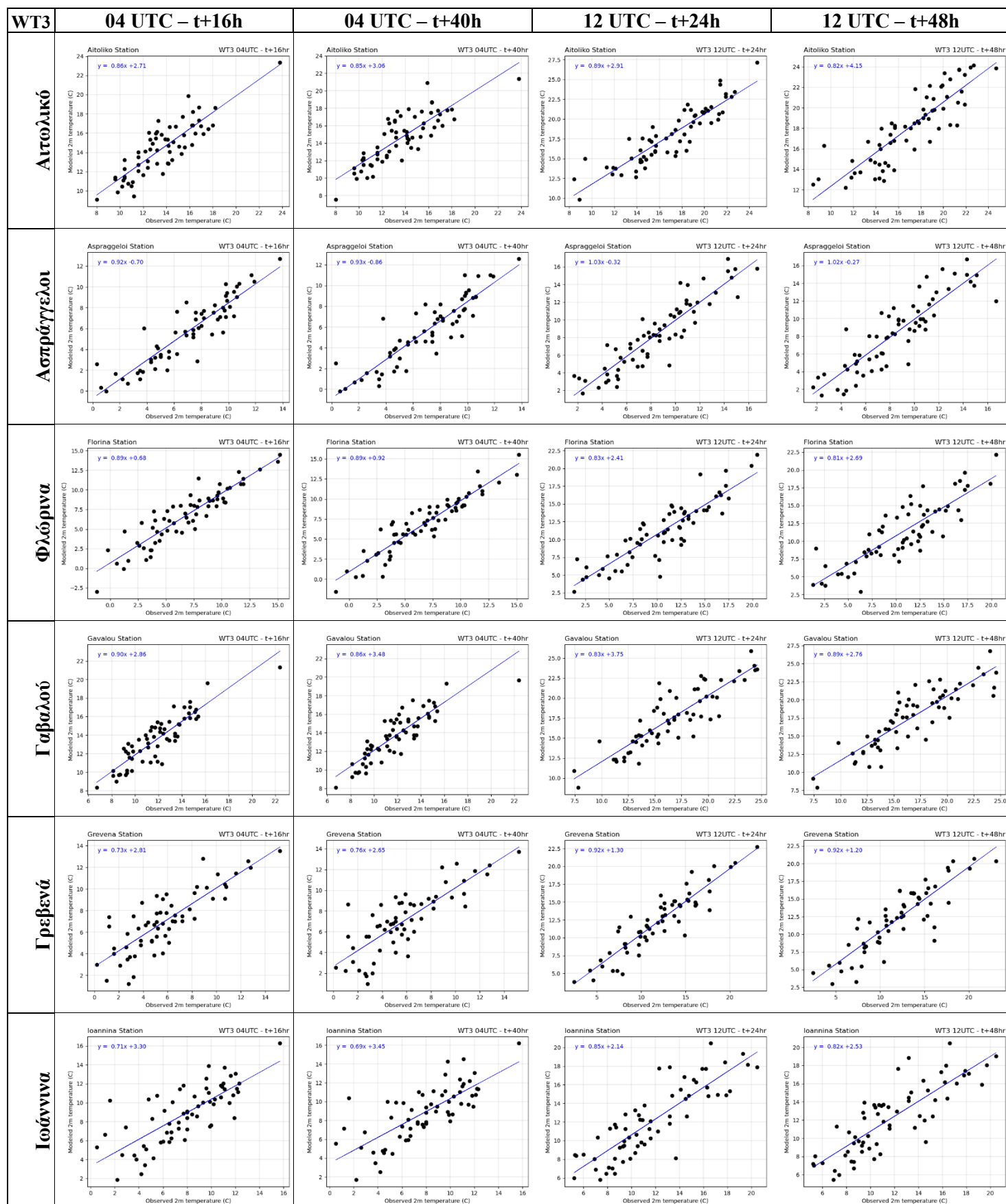


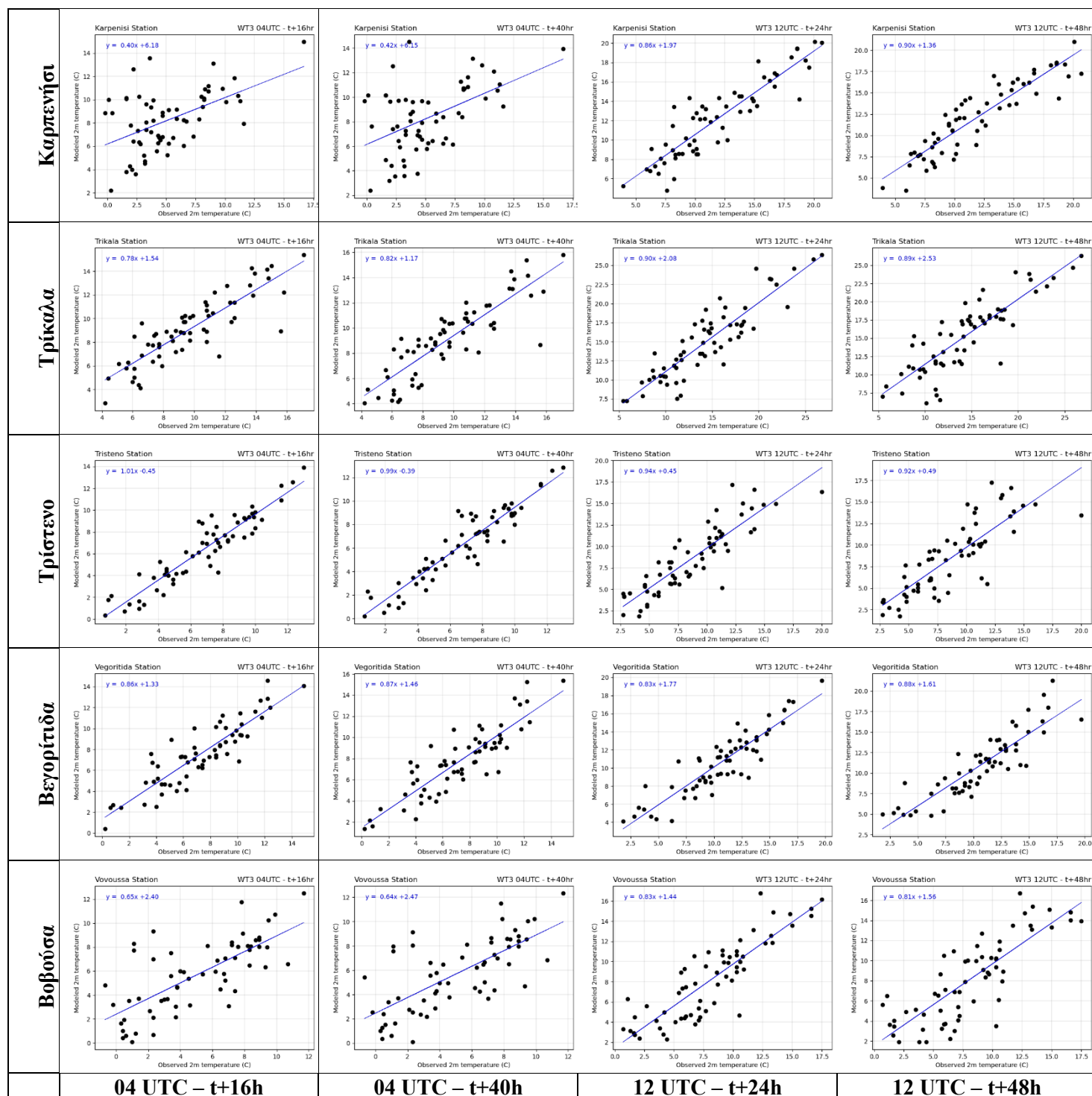
Σχήμα Β1. Γραφική απεικόνιση διασποράς των τιμών θερμοκρασίας του αέρα (°C) στα 2 μέτρα και της ευθείας των ελαχίστων τετραγώνων, για τα ζεύγη τιμών πρόγνωσης – παρατήρησης στις 04 UTC και 12 UTC για την πρώτη και δεύτερη ημέρα πρόγνωσης, για 11 μετεωρολογικούς σταθμούς για τον WT1.



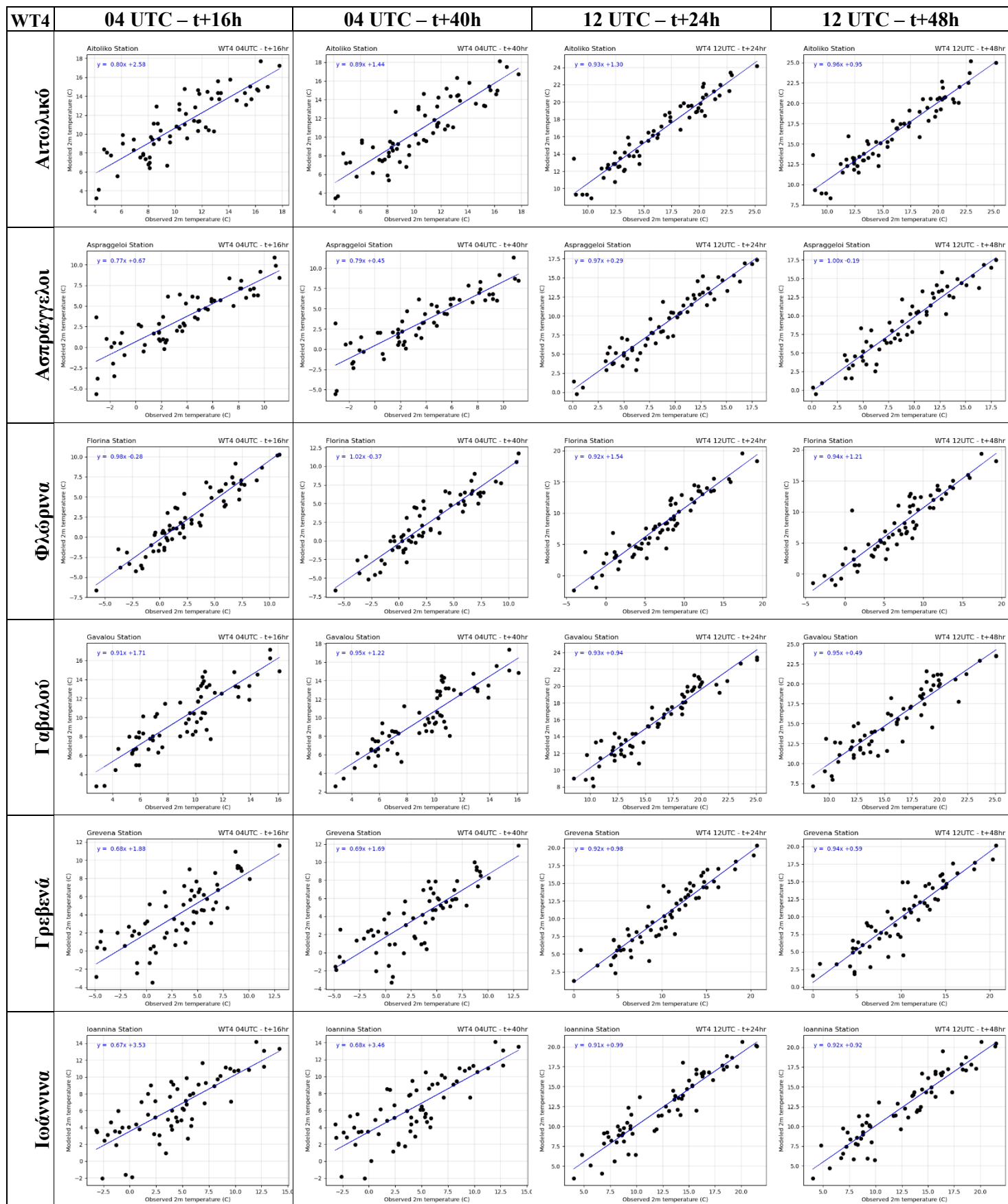


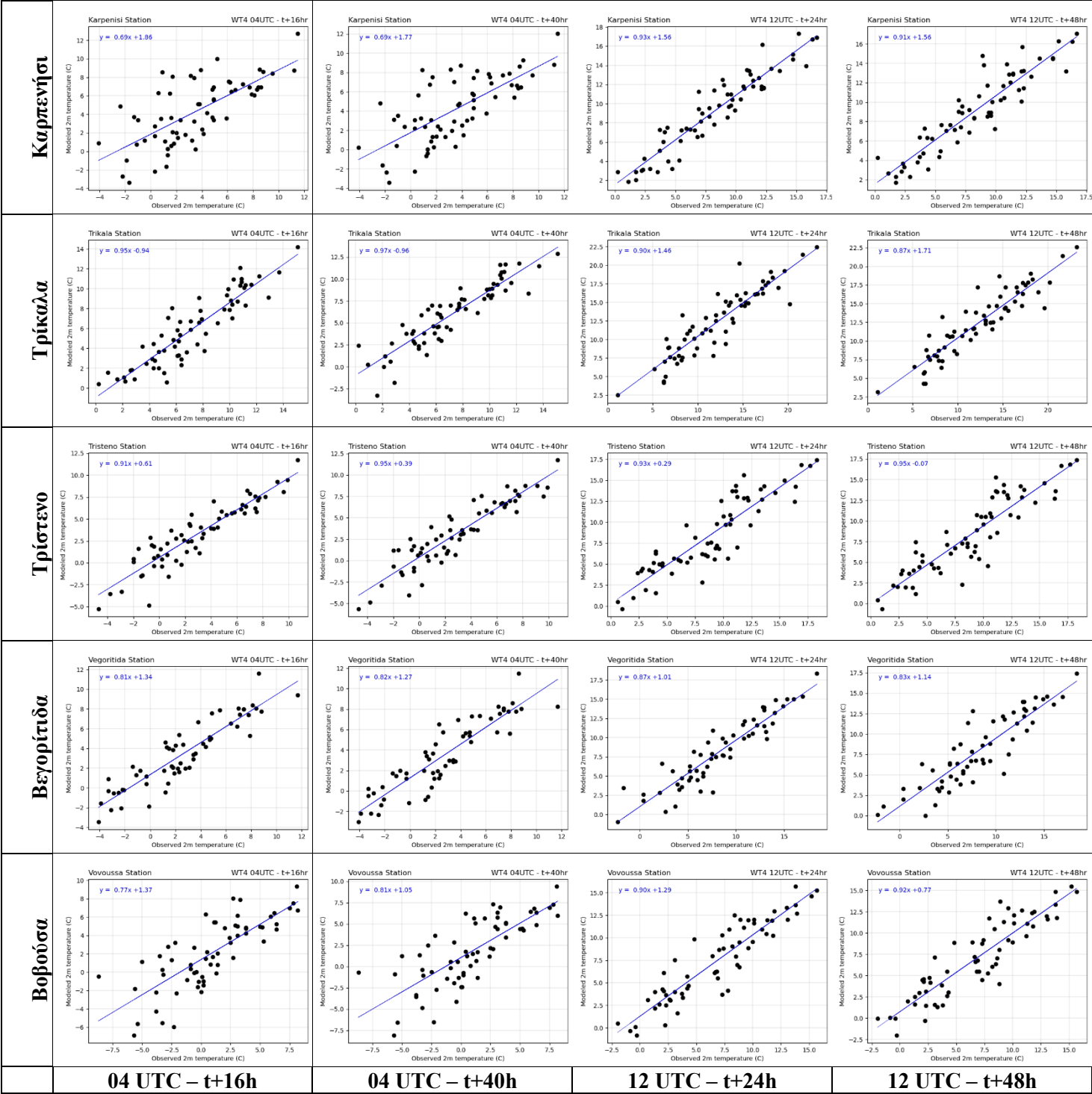
Σχήμα Β2. Όπως στο Σχήμα Β1, αλλά για τον WT2.



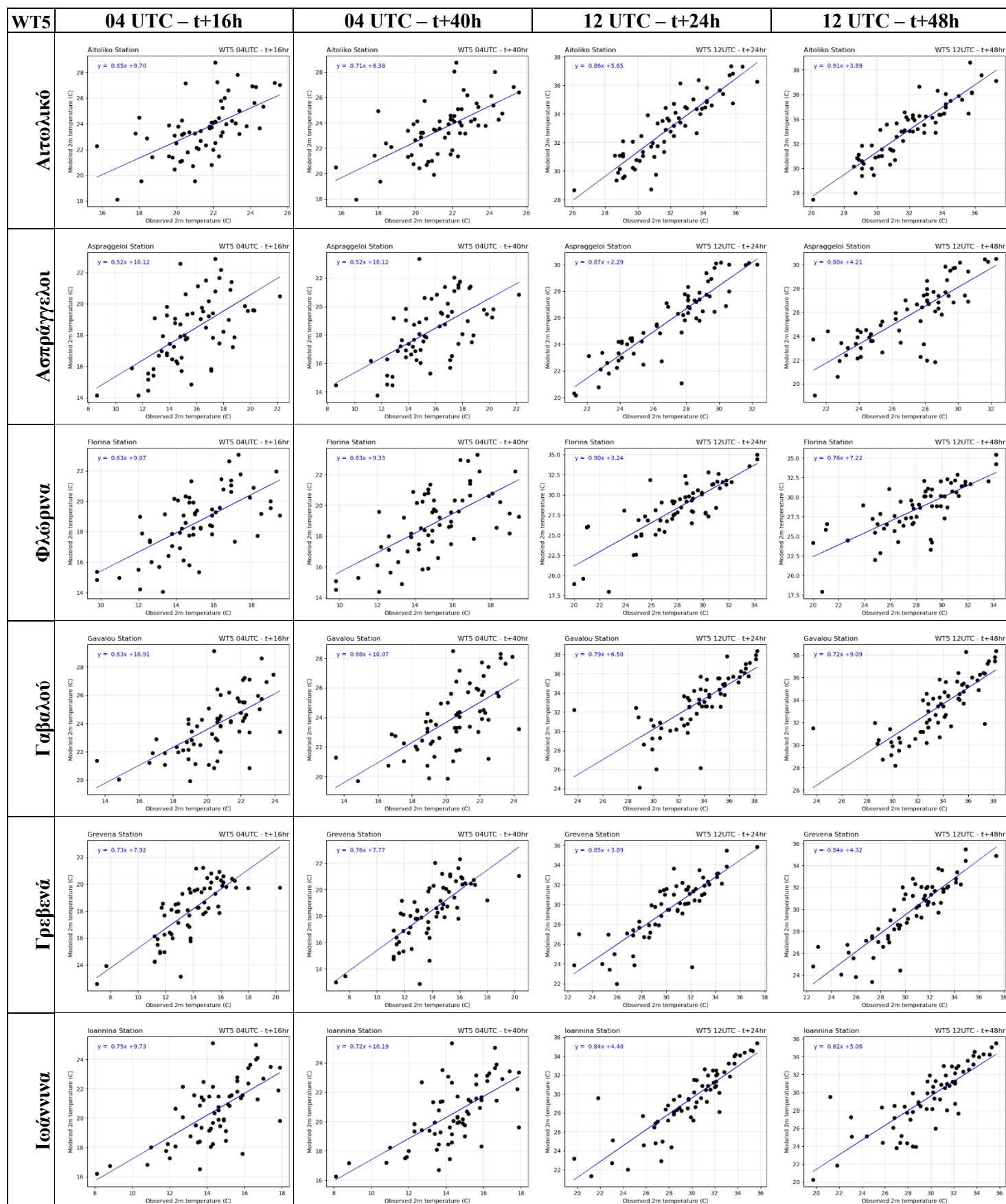


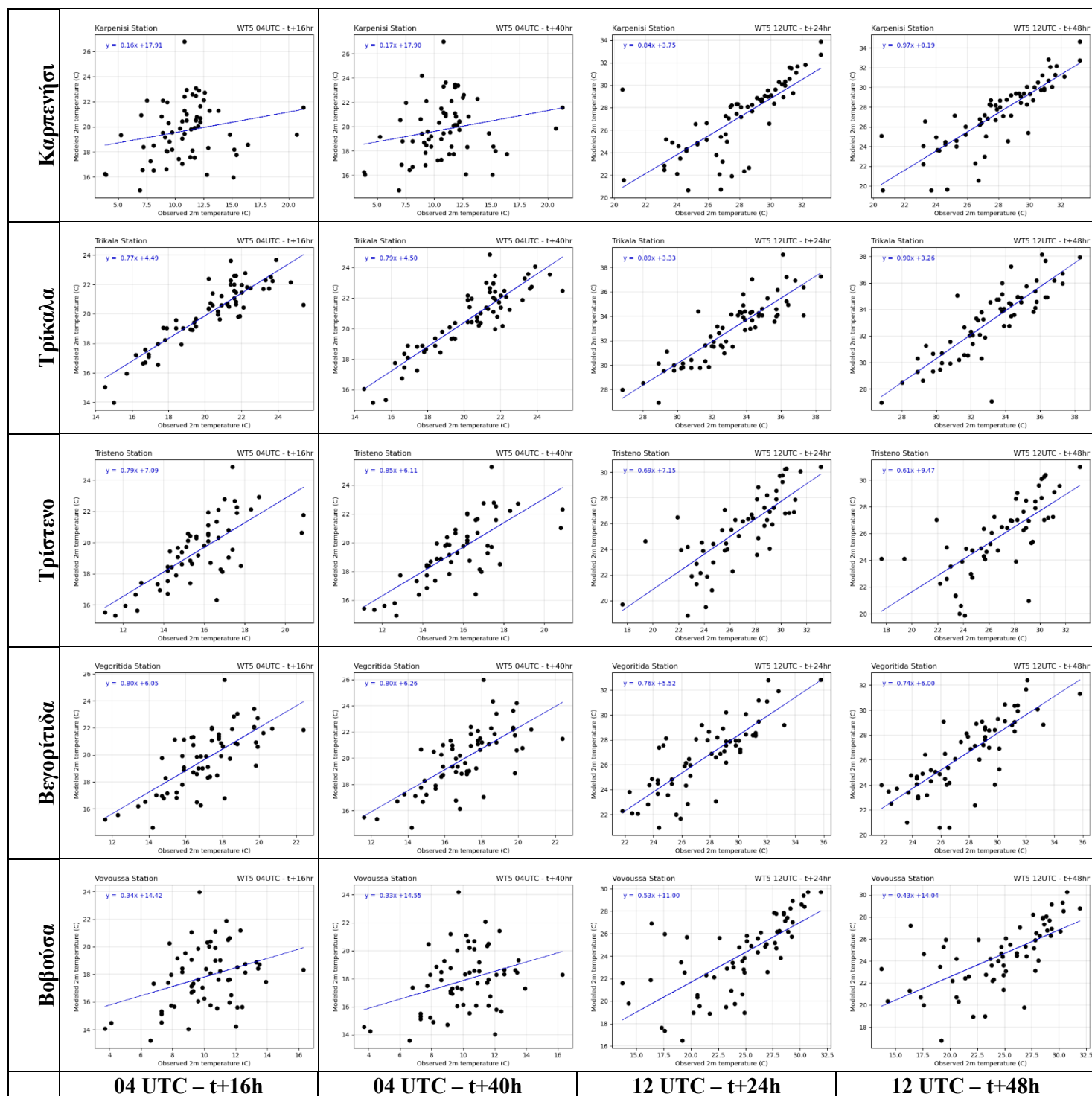
Σχήμα Β3. Όπως στο Σχήμα Β1, αλλά για τον WT3.



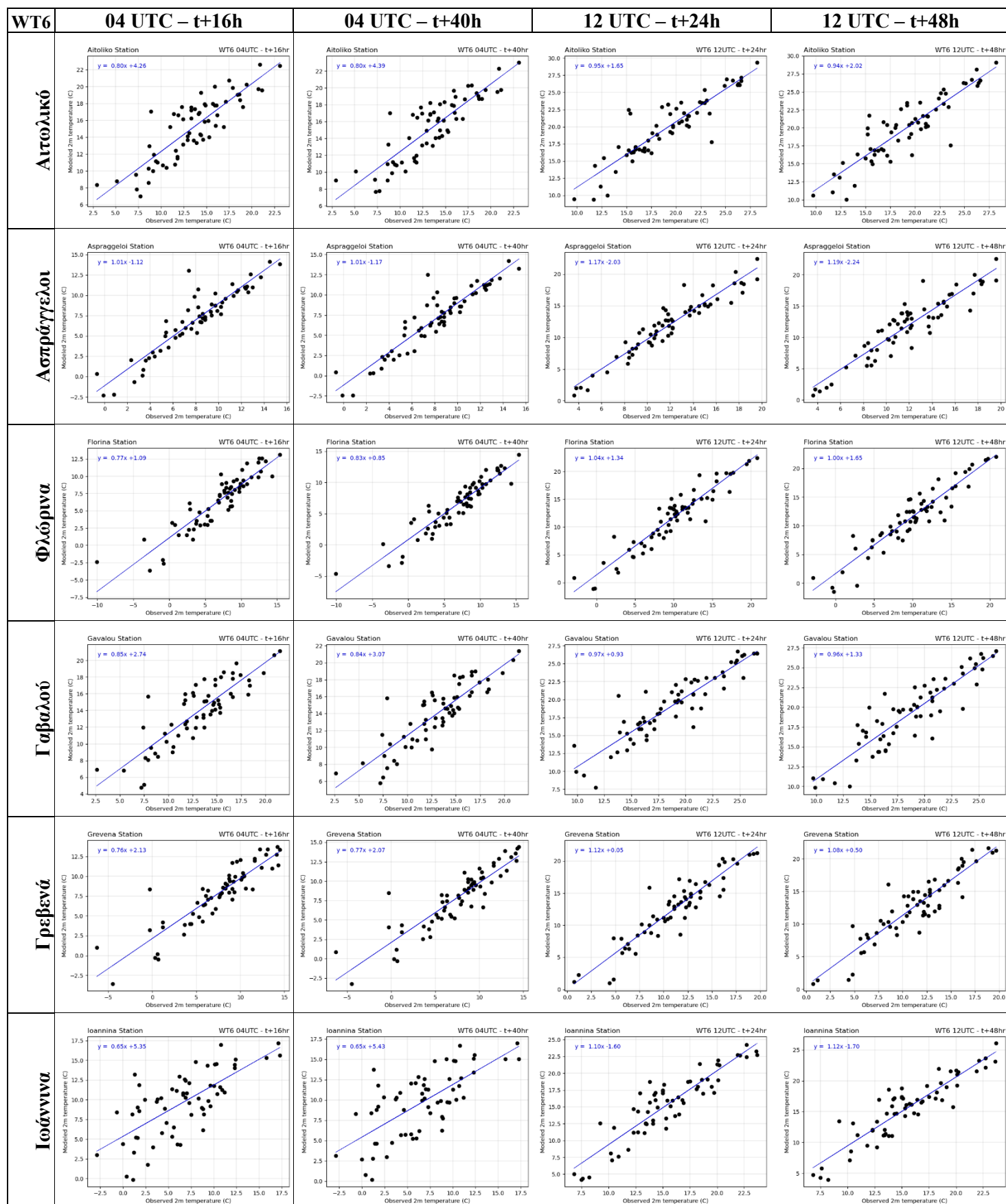


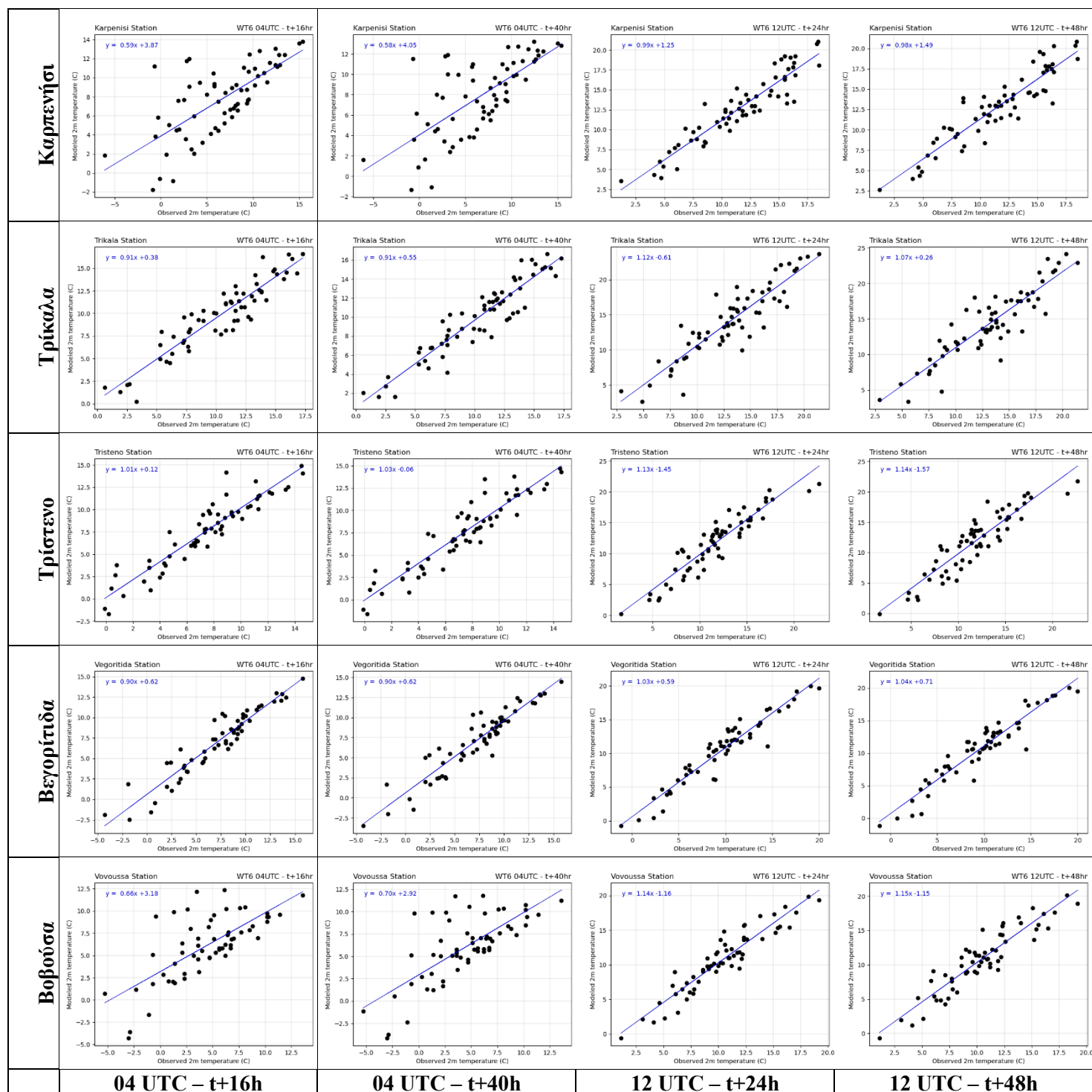
Σχήμα Β4. Όπως στο Σχήμα Β1, αλλά για τον WT4.



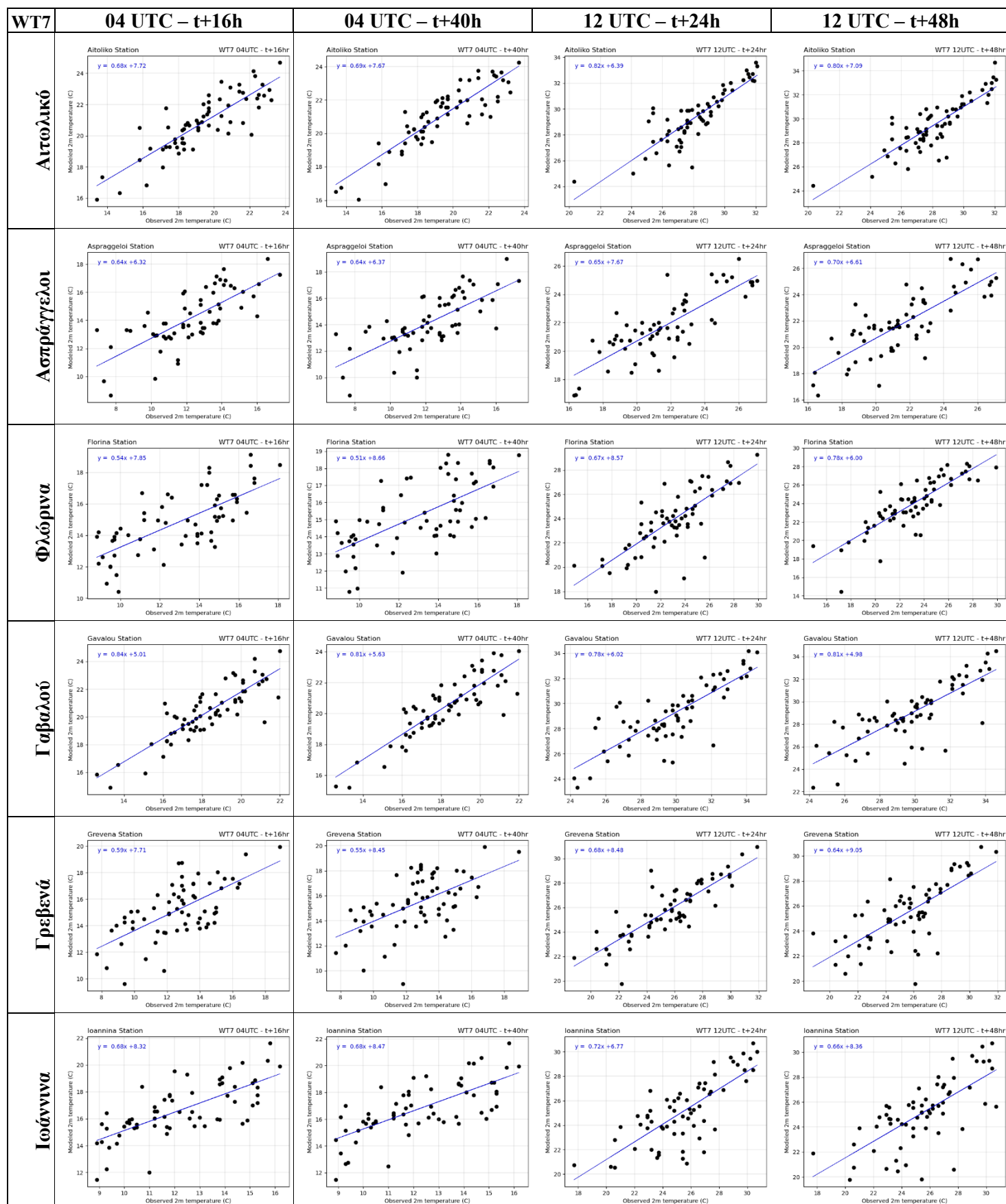


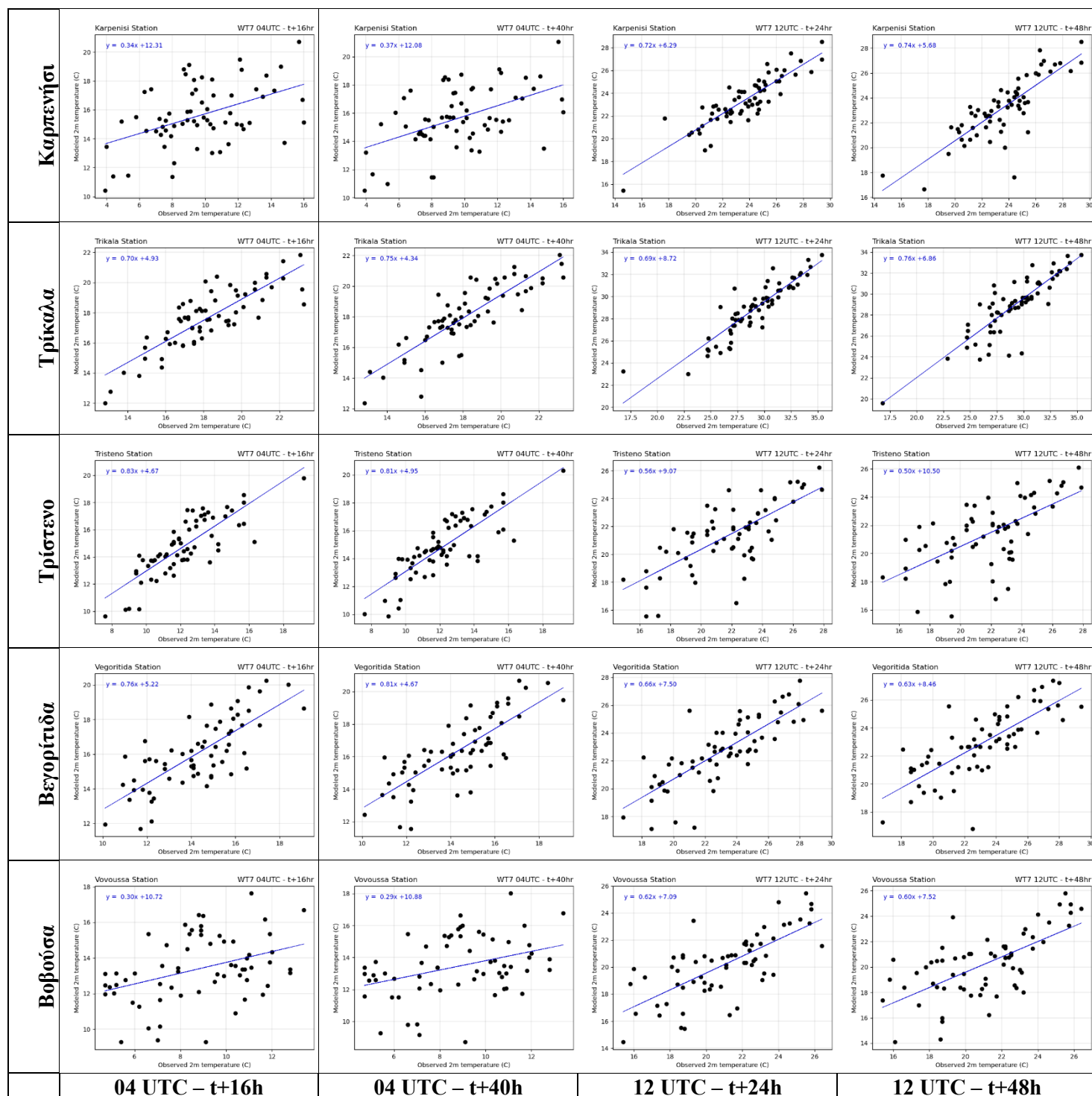
Σχήμα Β5. Όπως στο Σχήμα Β1, αλλά για τον WT5.



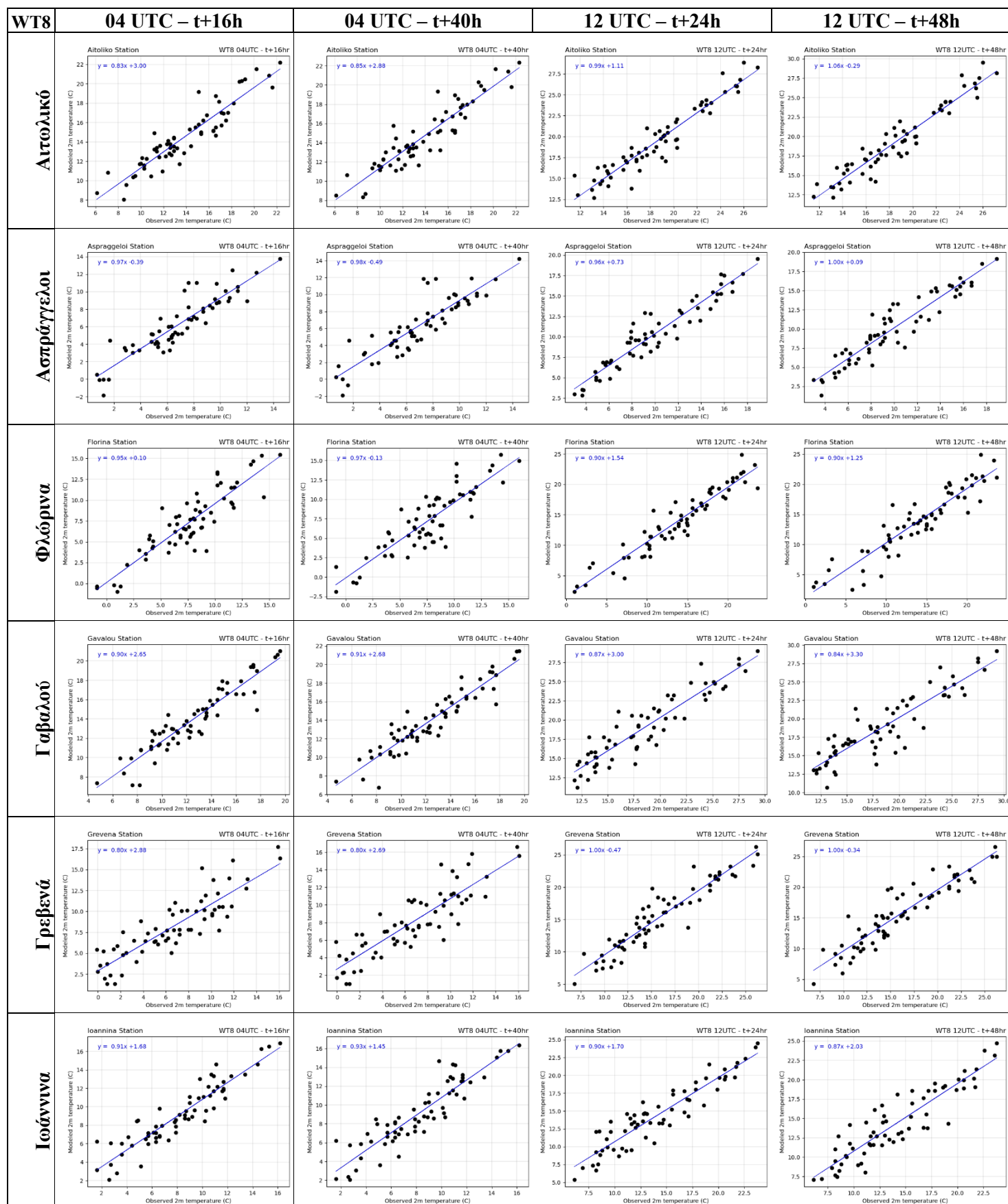


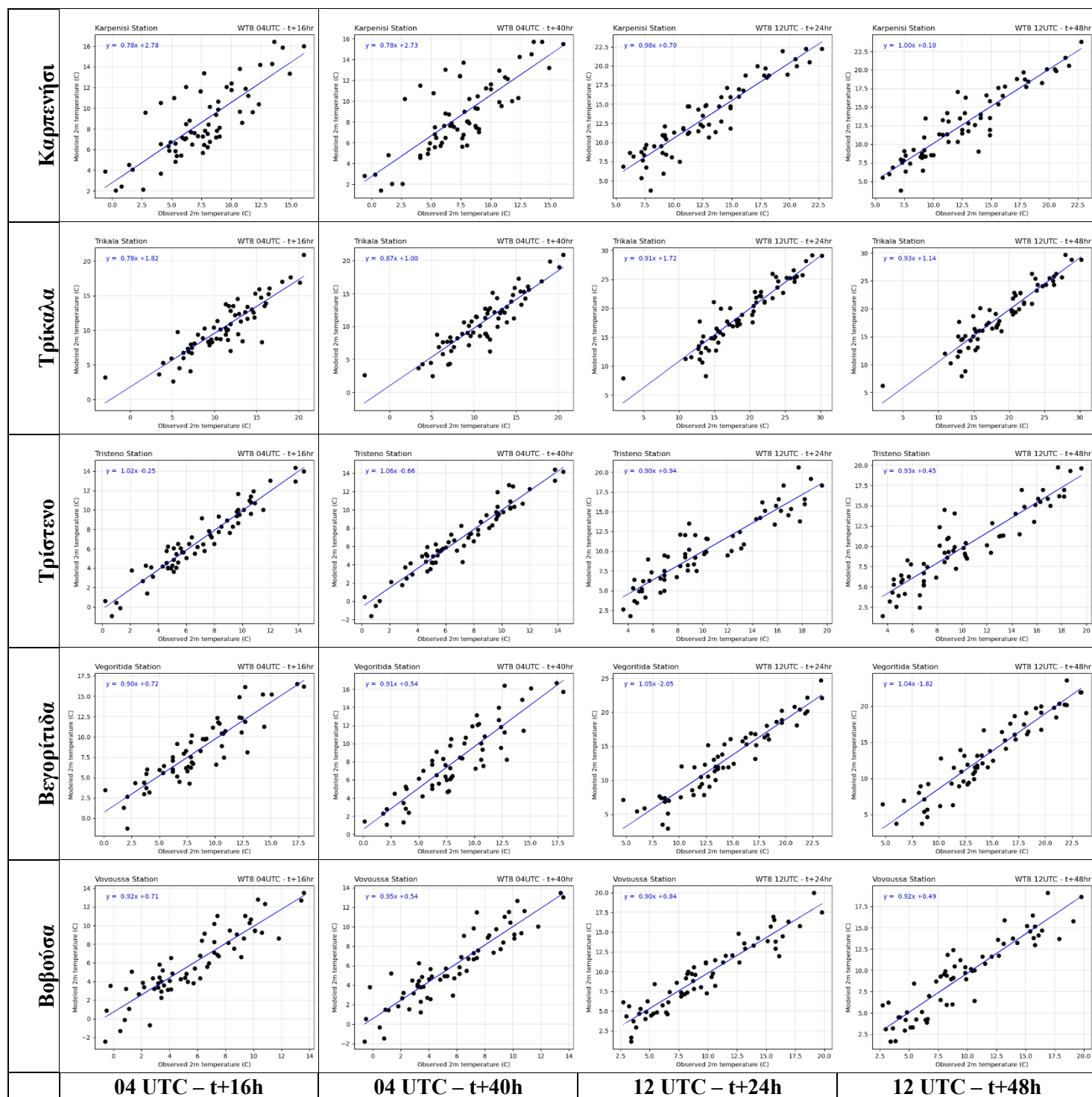
Σχήμα Β6. Όπως στο Σχήμα Β1, αλλά για τον WT6.



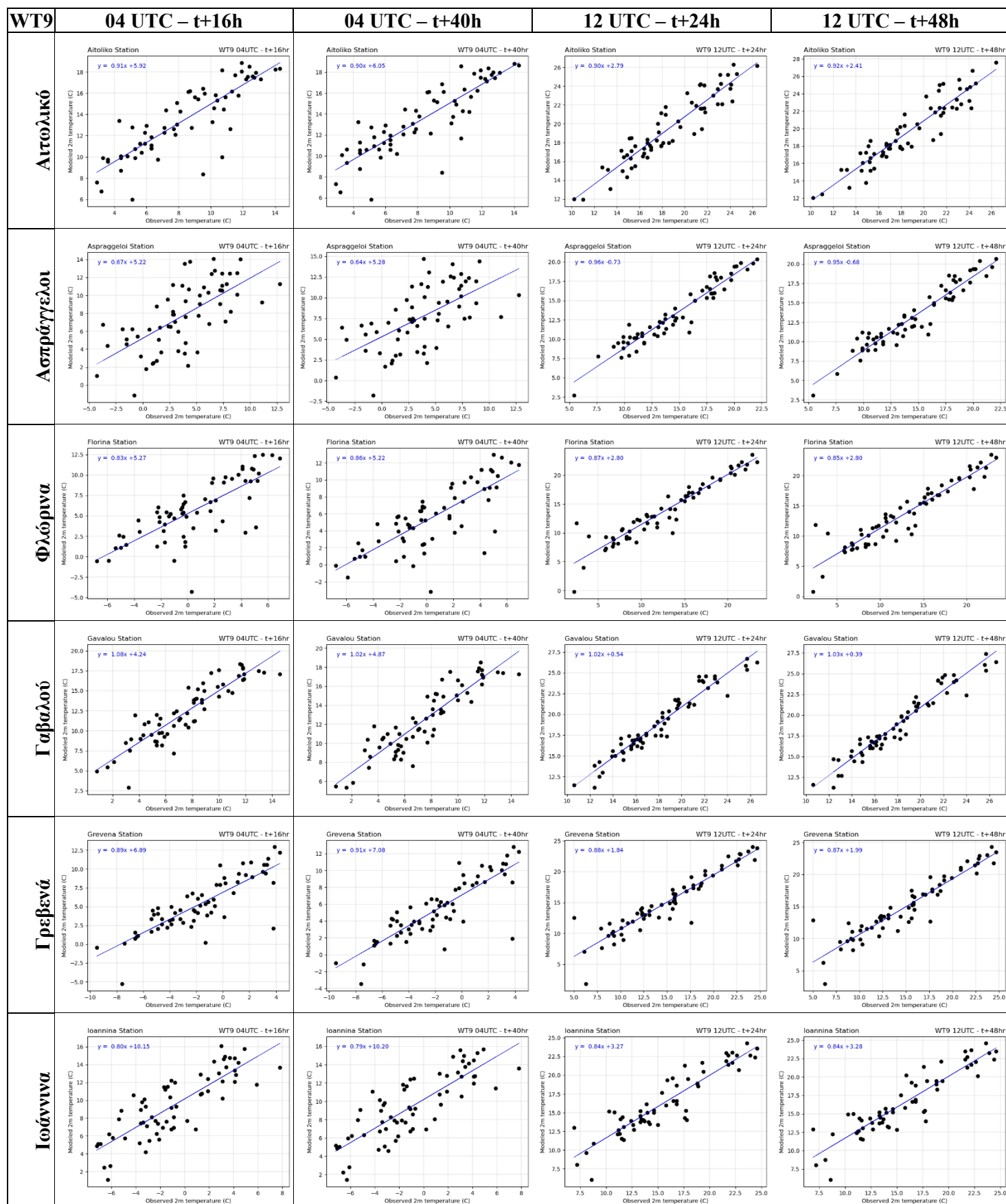


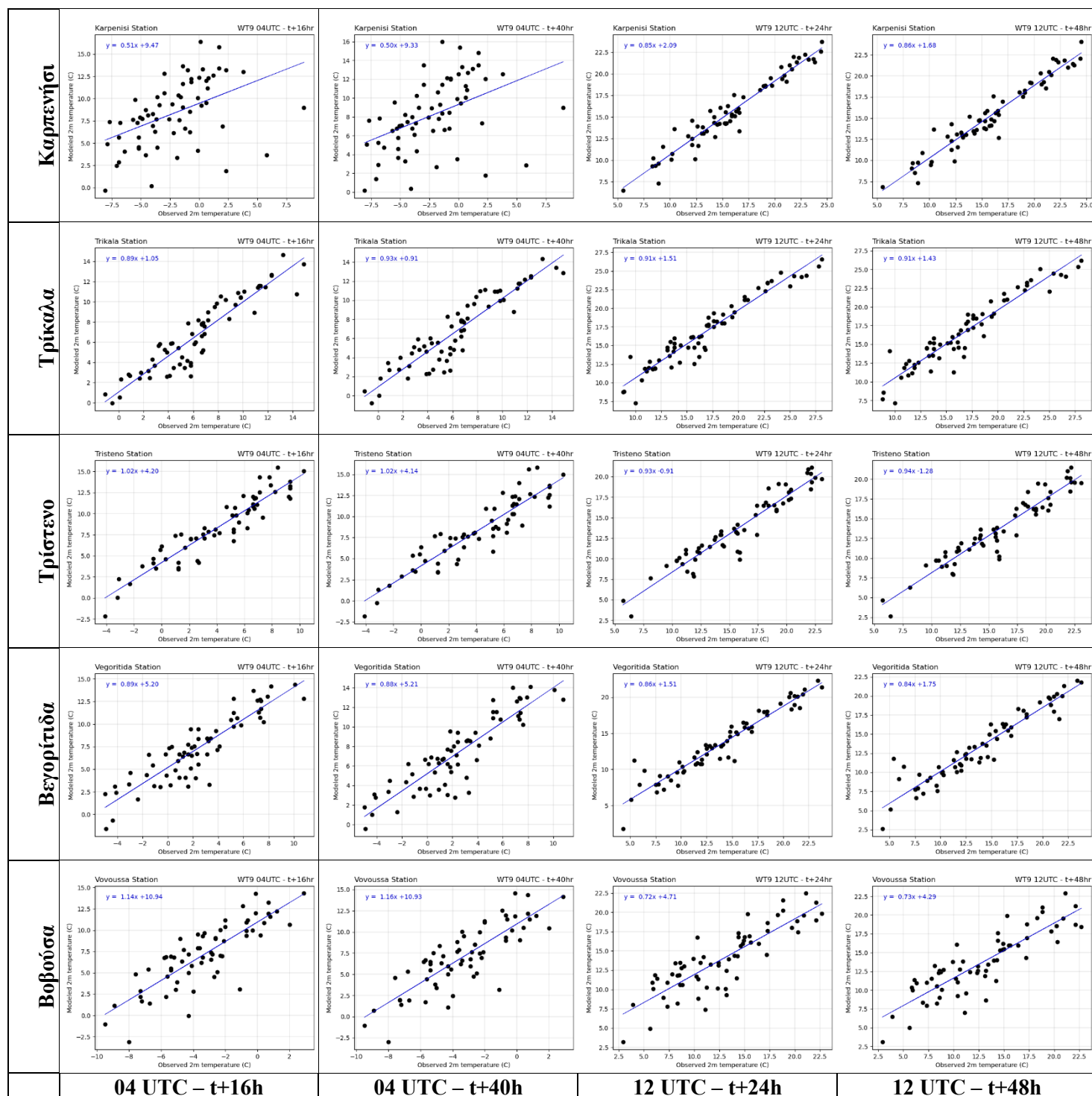
Σχήμα Β7. Όπως στο Σχήμα Β1, αλλά για τον WT7.



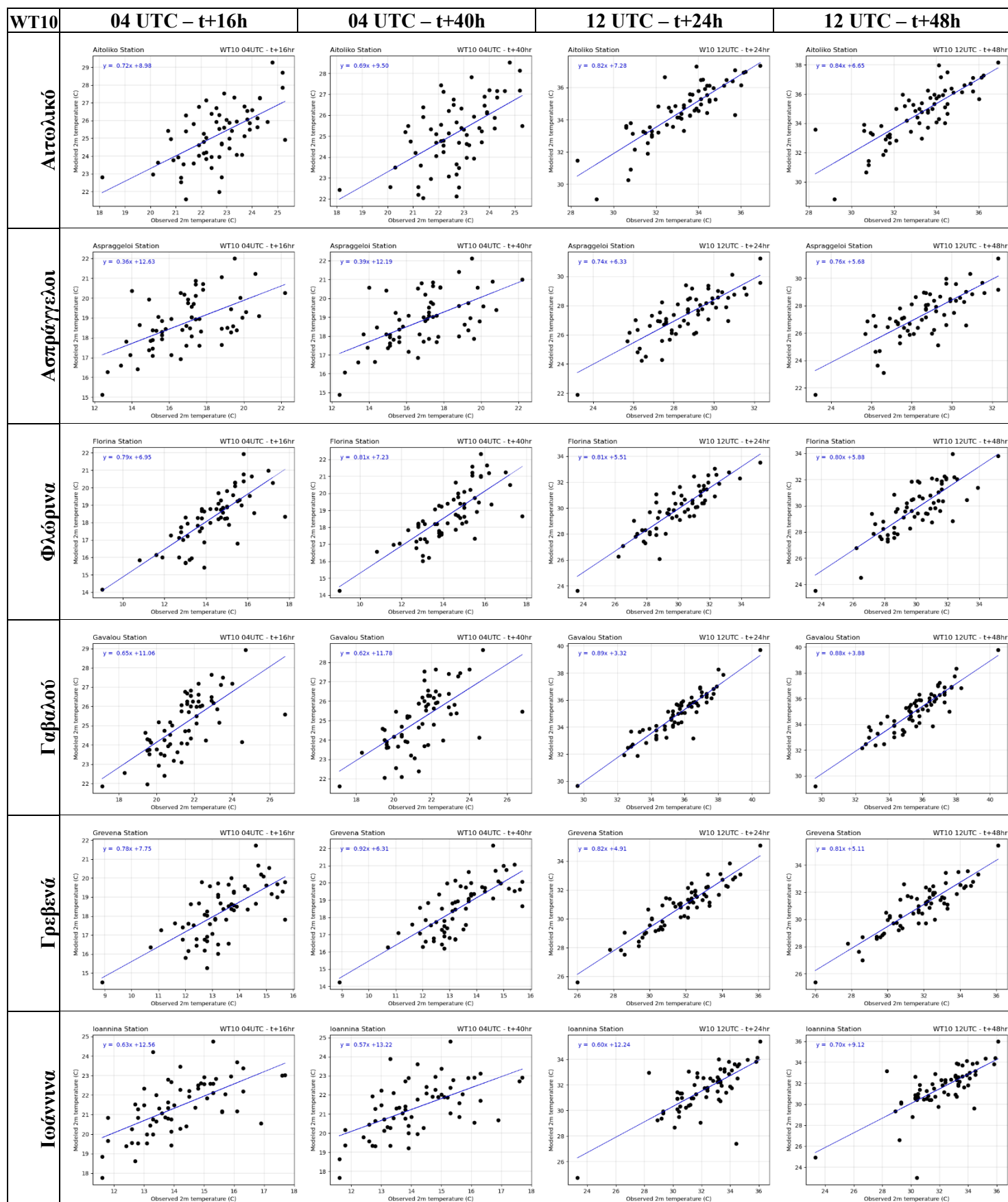


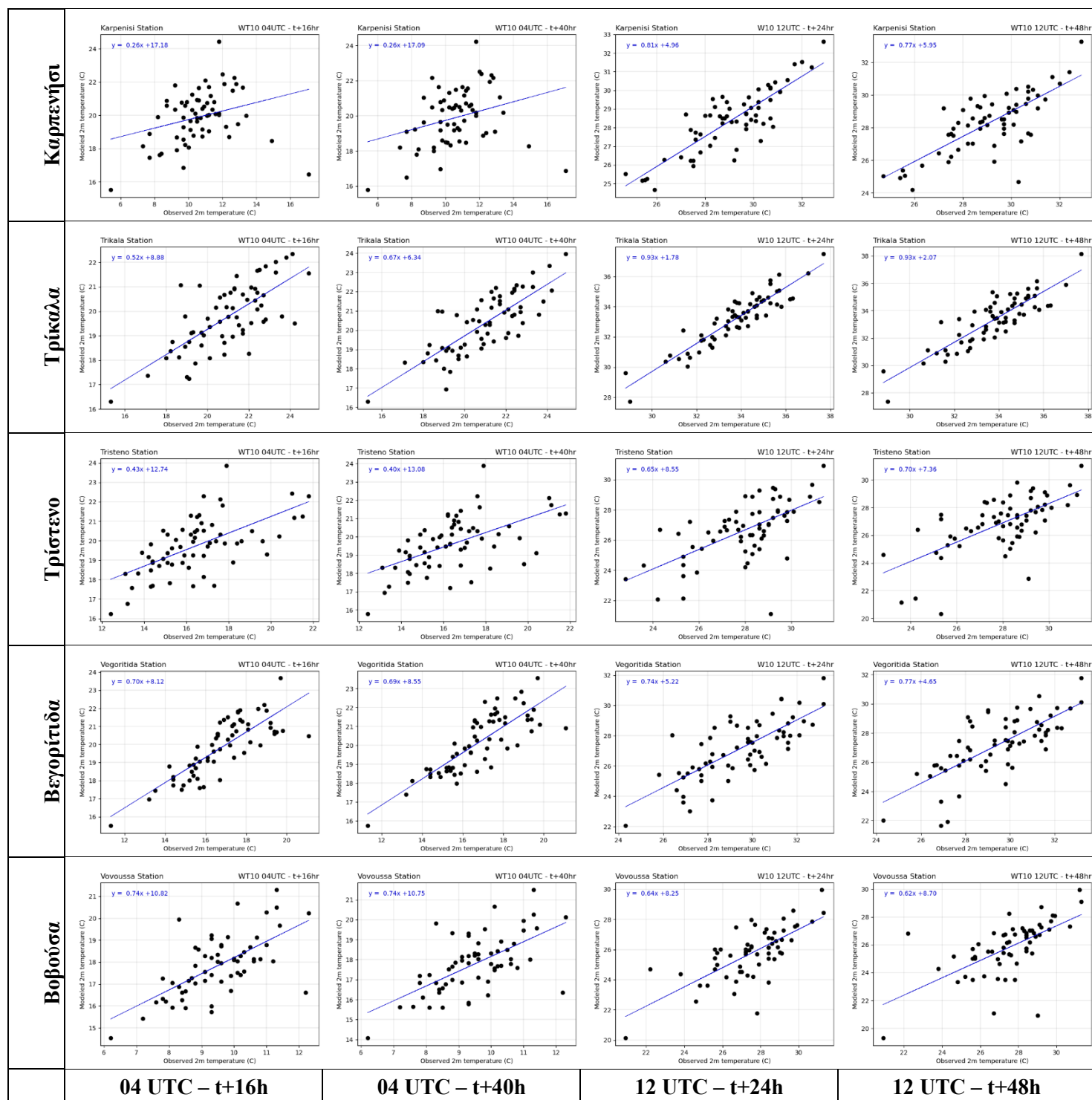
Σχήμα Β8. Όπως στο Σχήμα Β1, αλλά για τον WT8.





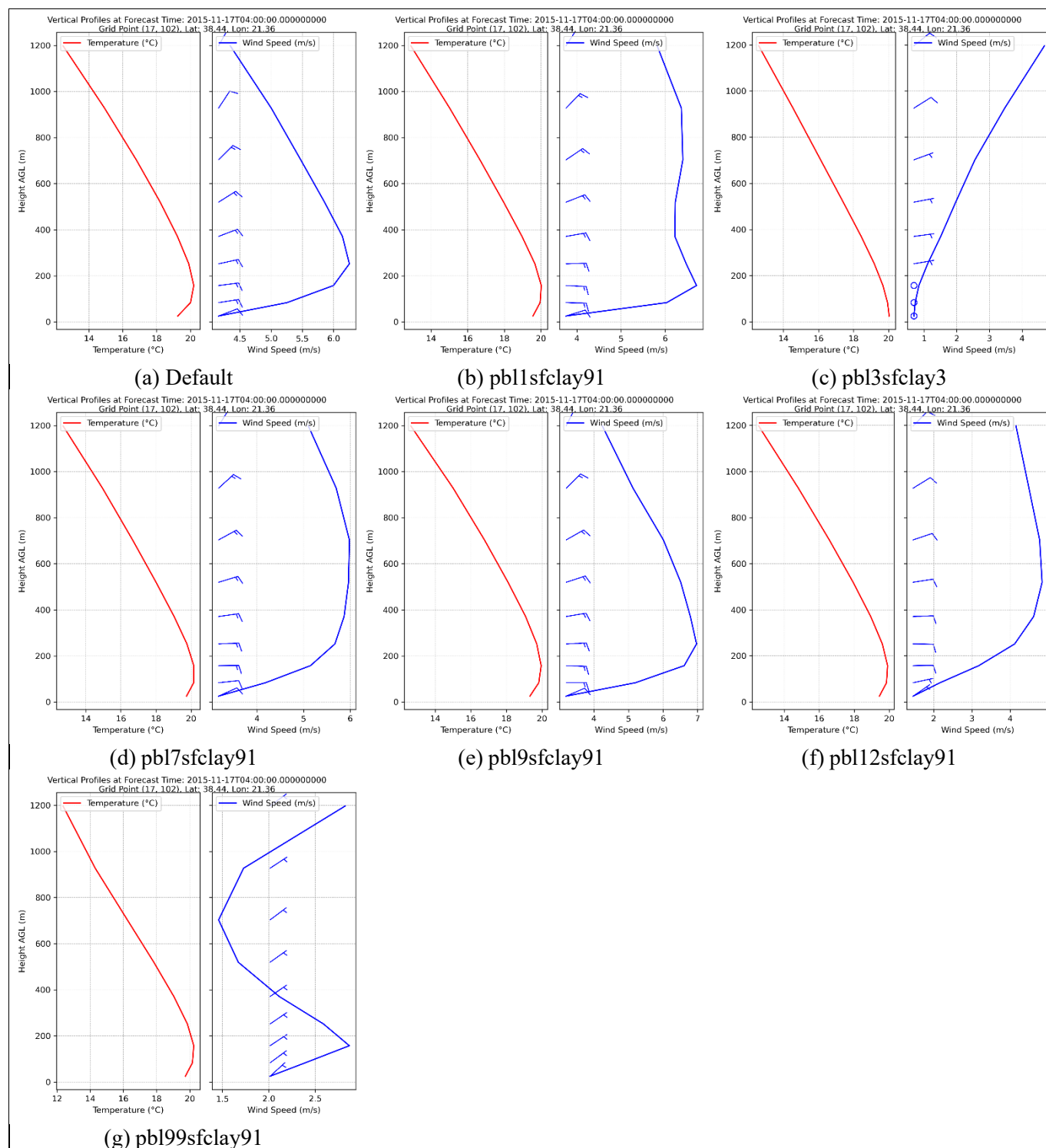
Σχήμα Β9. Όπως στο Σχήμα Β1, αλλά για τον WT9.



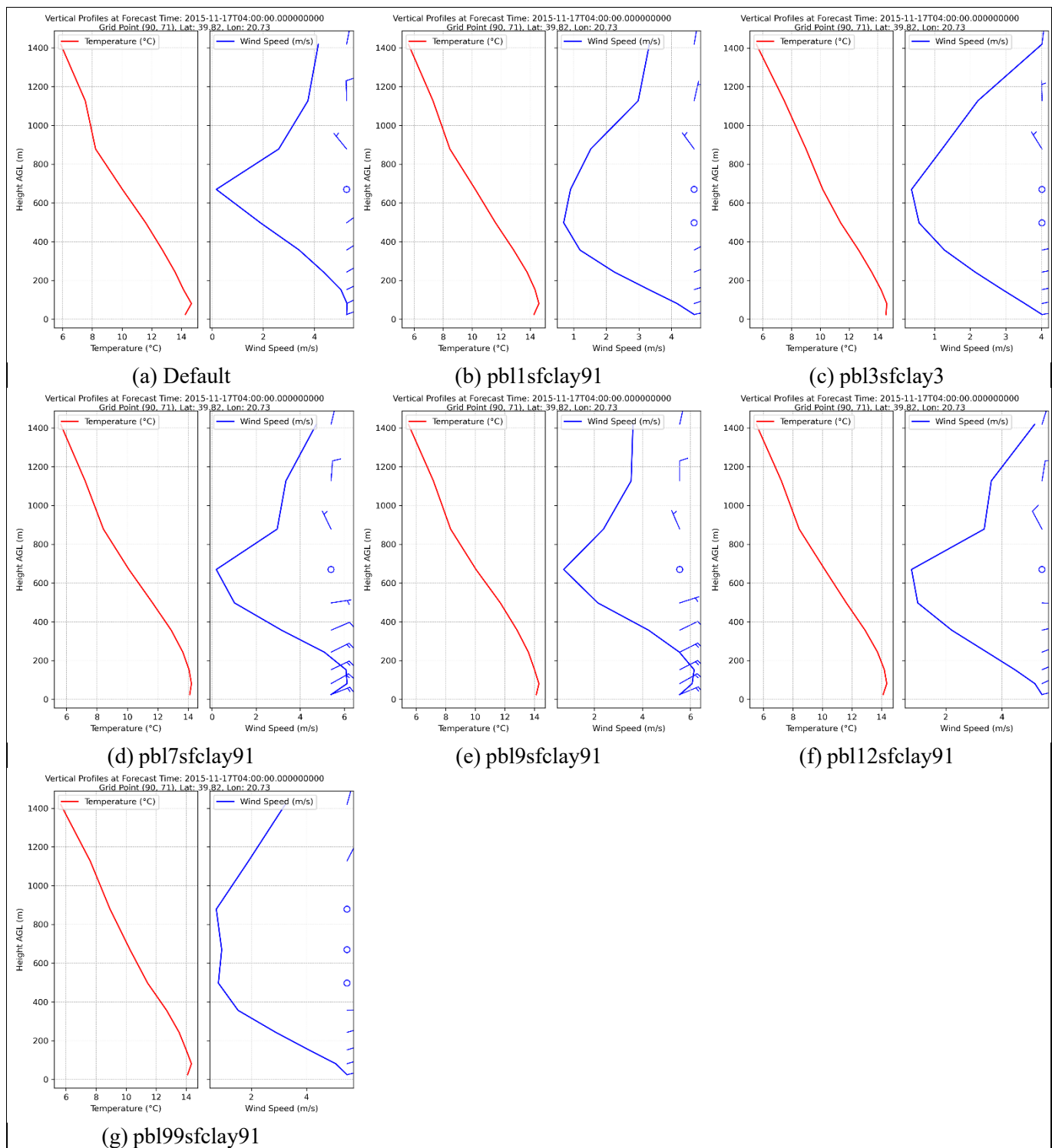


Σχήμα B10. Όπως στο Σχήμα B1, αλλά για τον WT10.

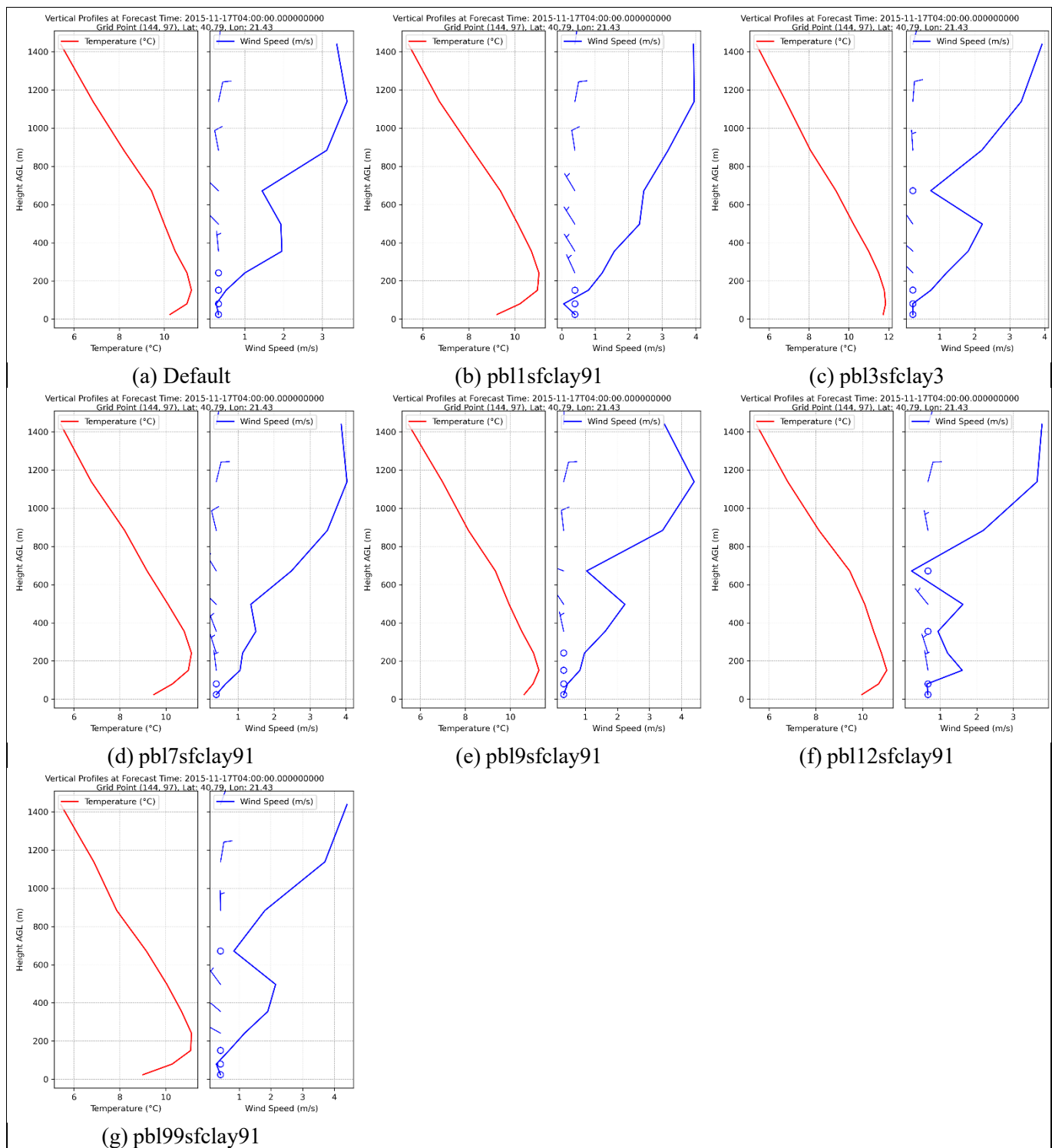
Παράρτημα Γ



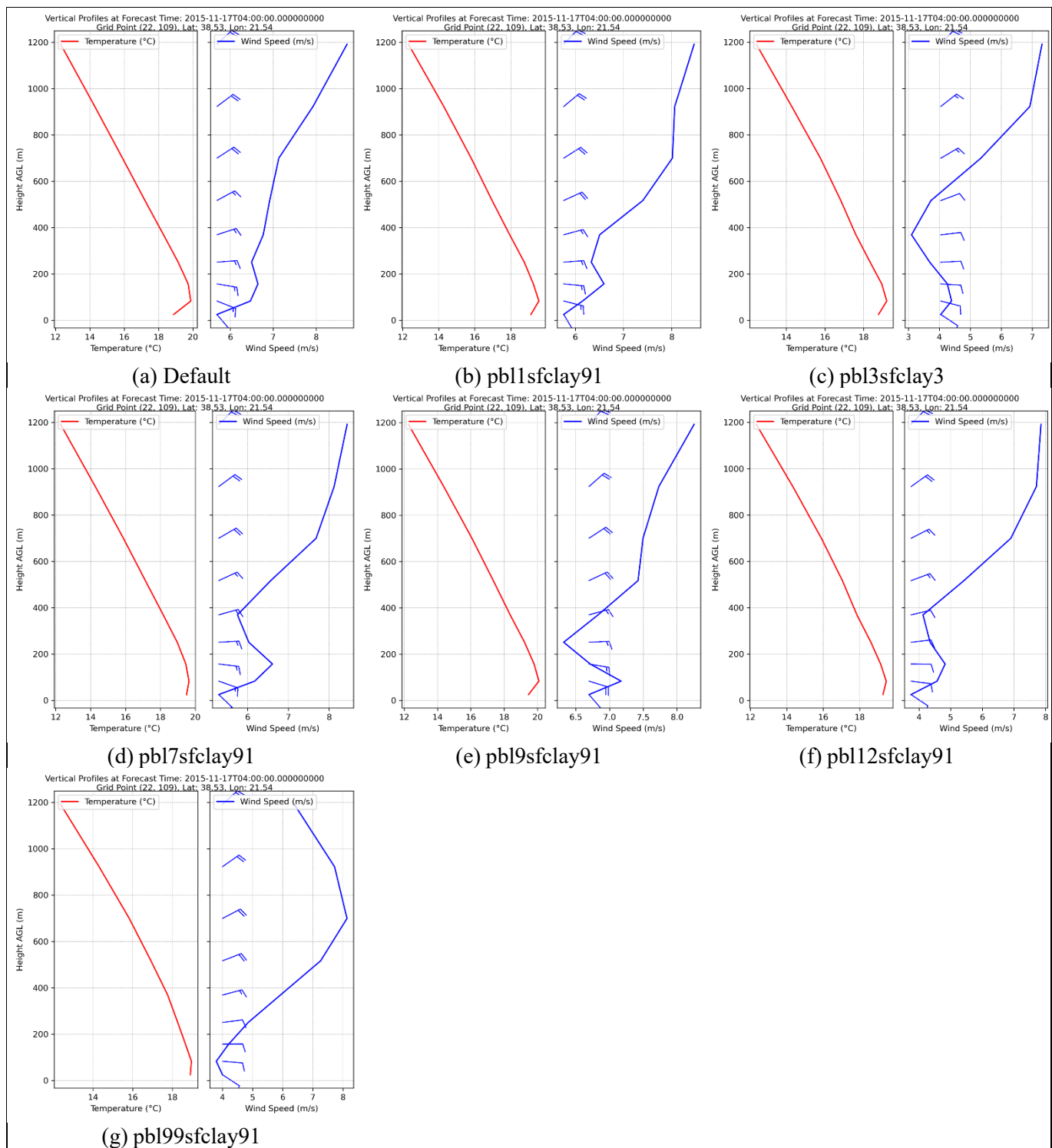
Σχήμα Γ1. Κατανομές θερμοκρασίας (°C) και ταχύτητας ανέμου (m/s) καθ' ύψος στις 04 UTC της πλησιέστερης ημέρας στο κέντρο της συστάδας του WT9 για το πλησιέστερο πλεγματικό σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό Αιτωλικού, για τις προεπιλεγμένες και διάφορες φυσικές παραμετροποιήσεις.



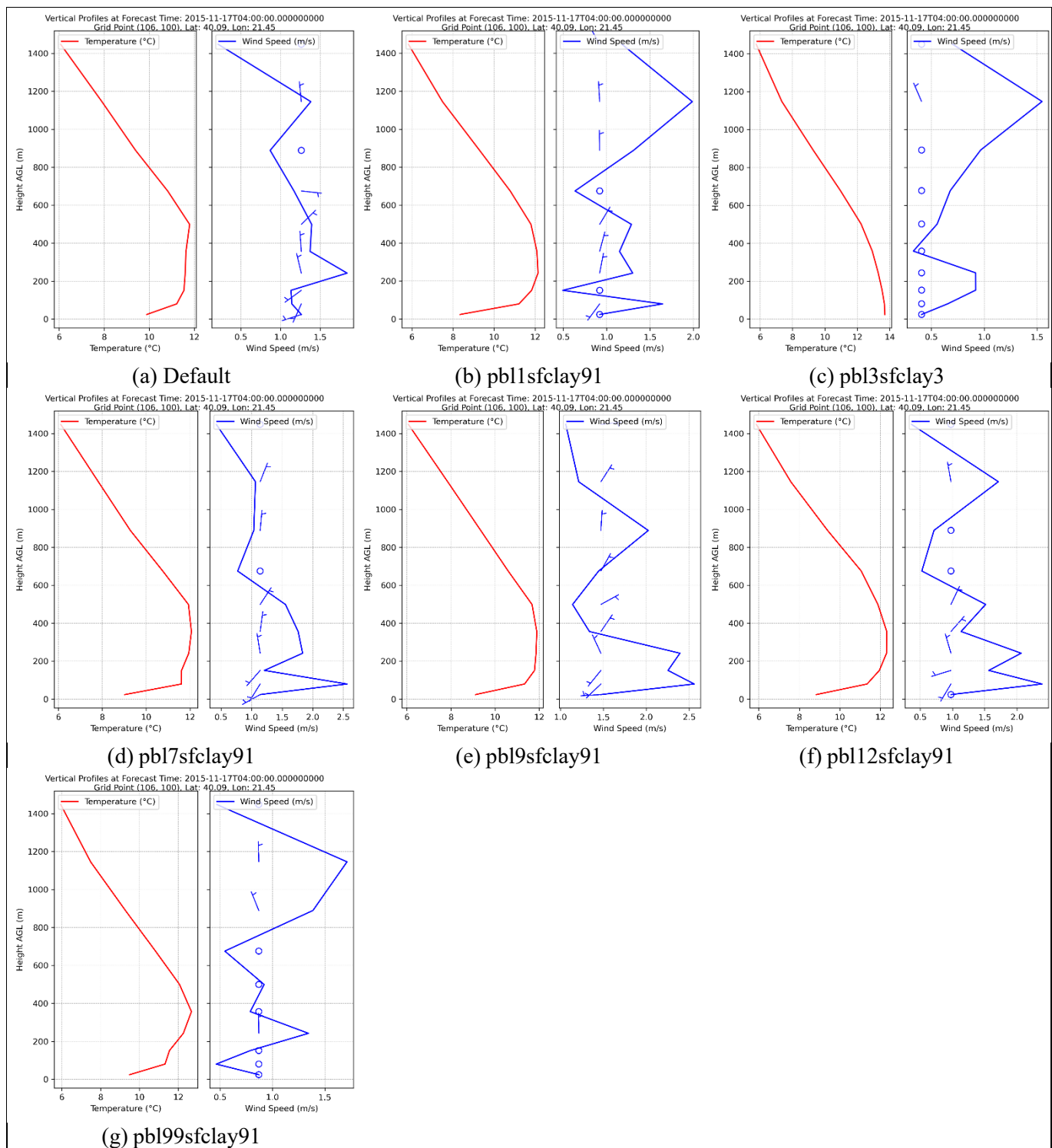
Σχήμα Γ2. Όπως στο Σχήμα Γ1, αλλά για το πλησιέστερο πλεγματικό σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό Ασπραγέλων.



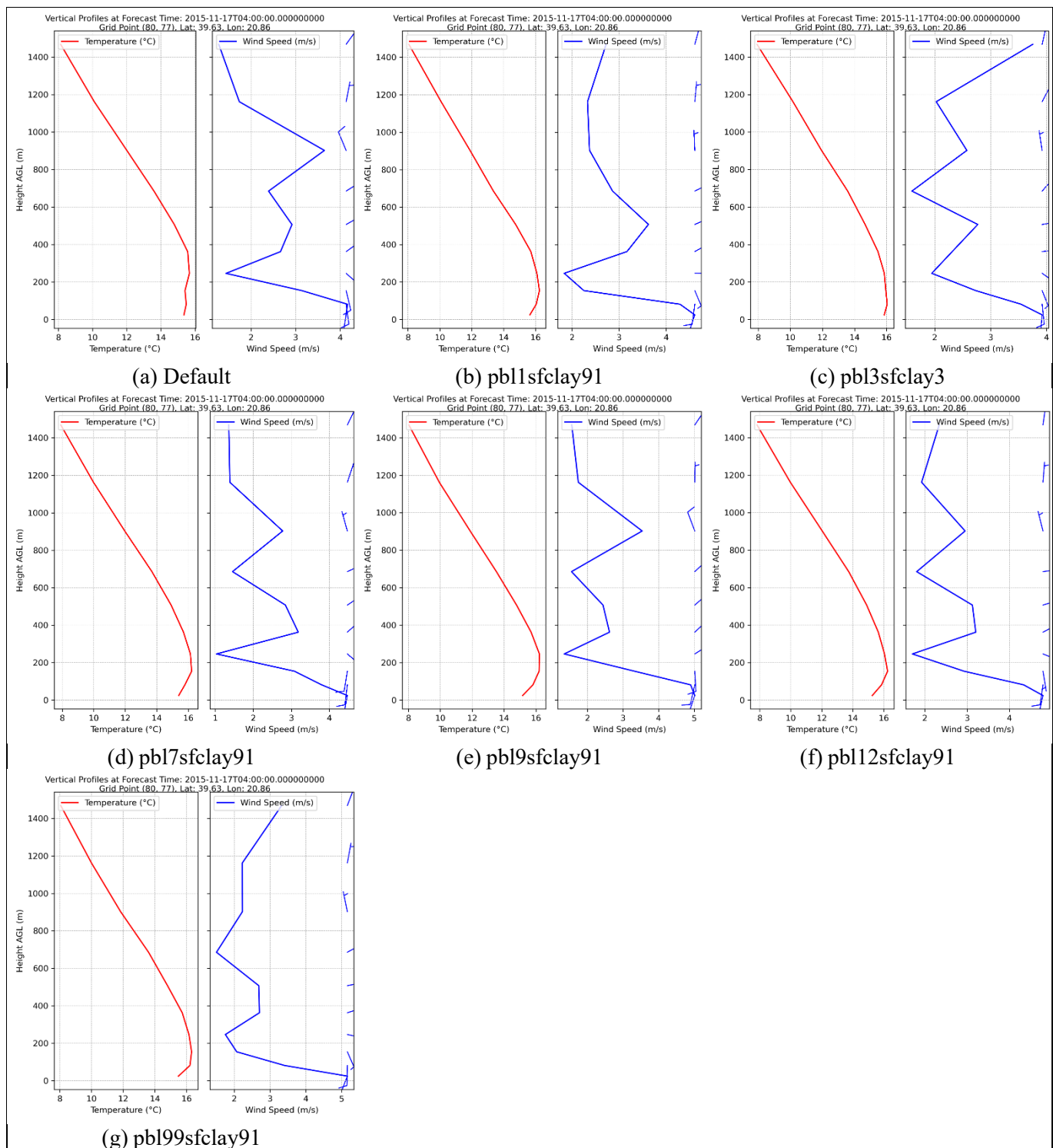
Σχήμα Γ3. Όπως στο Σχήμα Γ1, αλλά για το πλησιέστερο πλεγματικό σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό Φλώρινας.



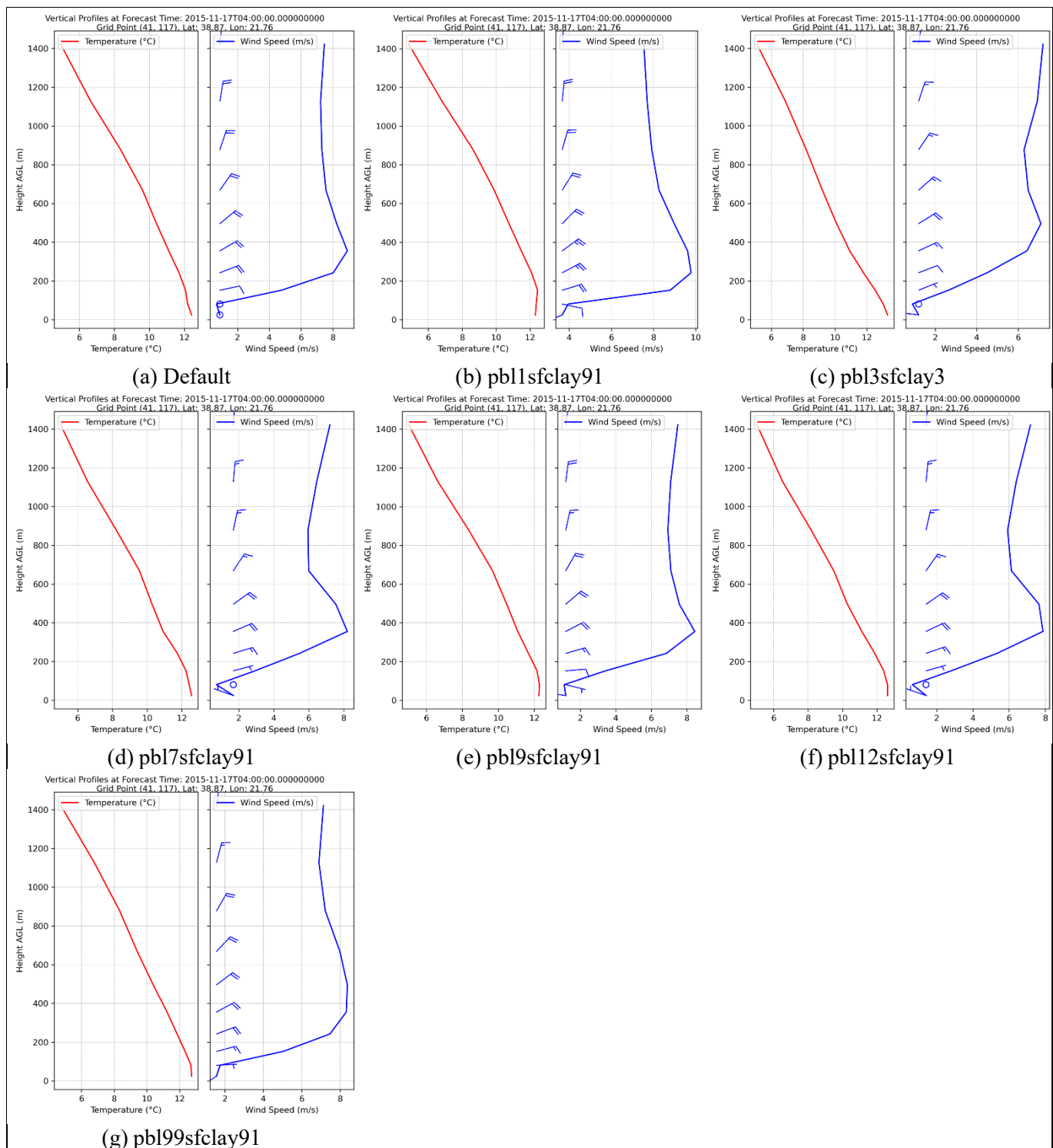
Σχήμα Γ4. Όπως στο Σχήμα Γ1, αλλά για το πλησιέστερο πλεγματικό σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό Γαβαλούς.



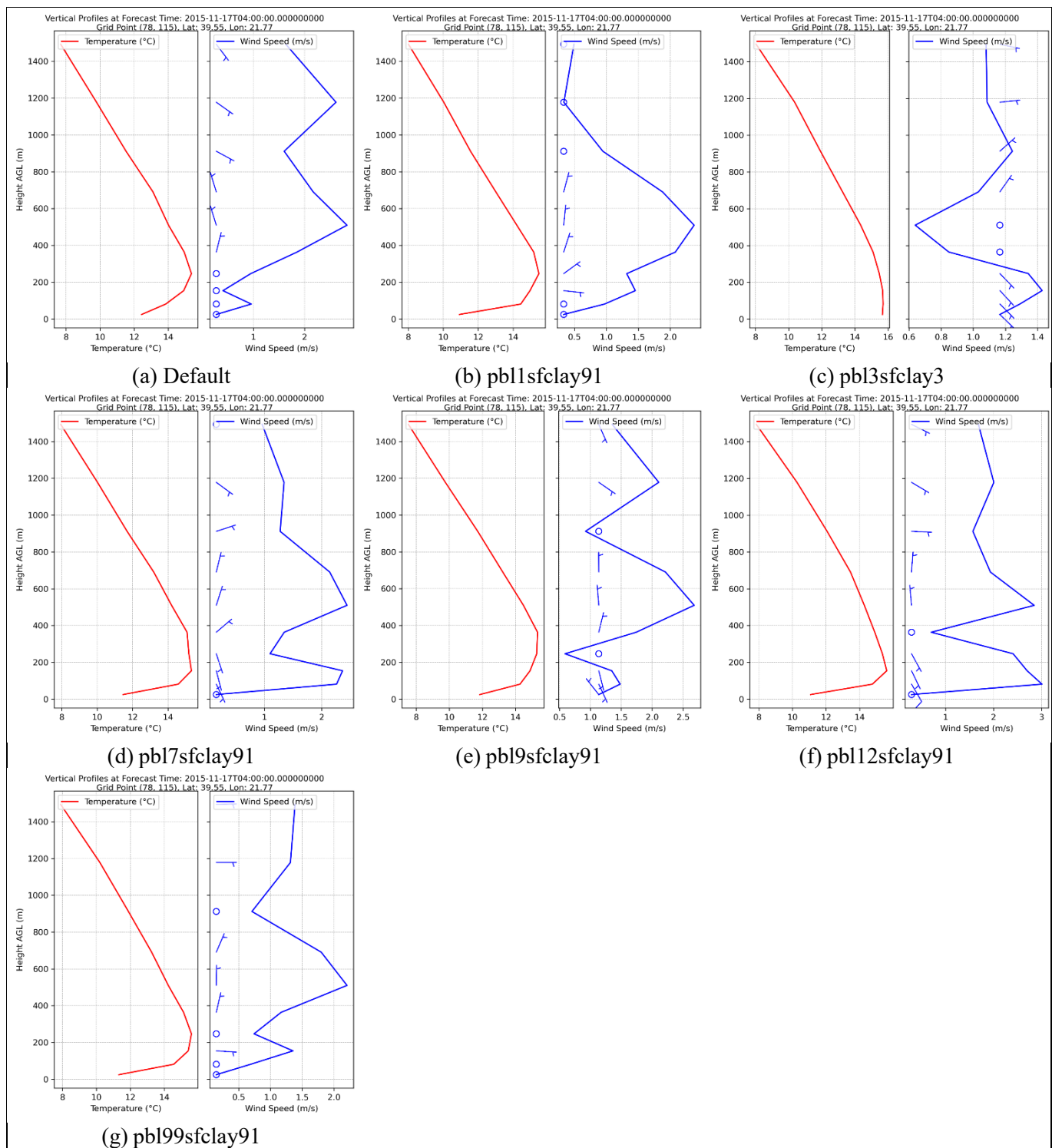
Σχήμα Γ5. Όπως στο Σχήμα Γ1, αλλά για το πλησιέστερο πλεγματικό σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό Γρεβών.



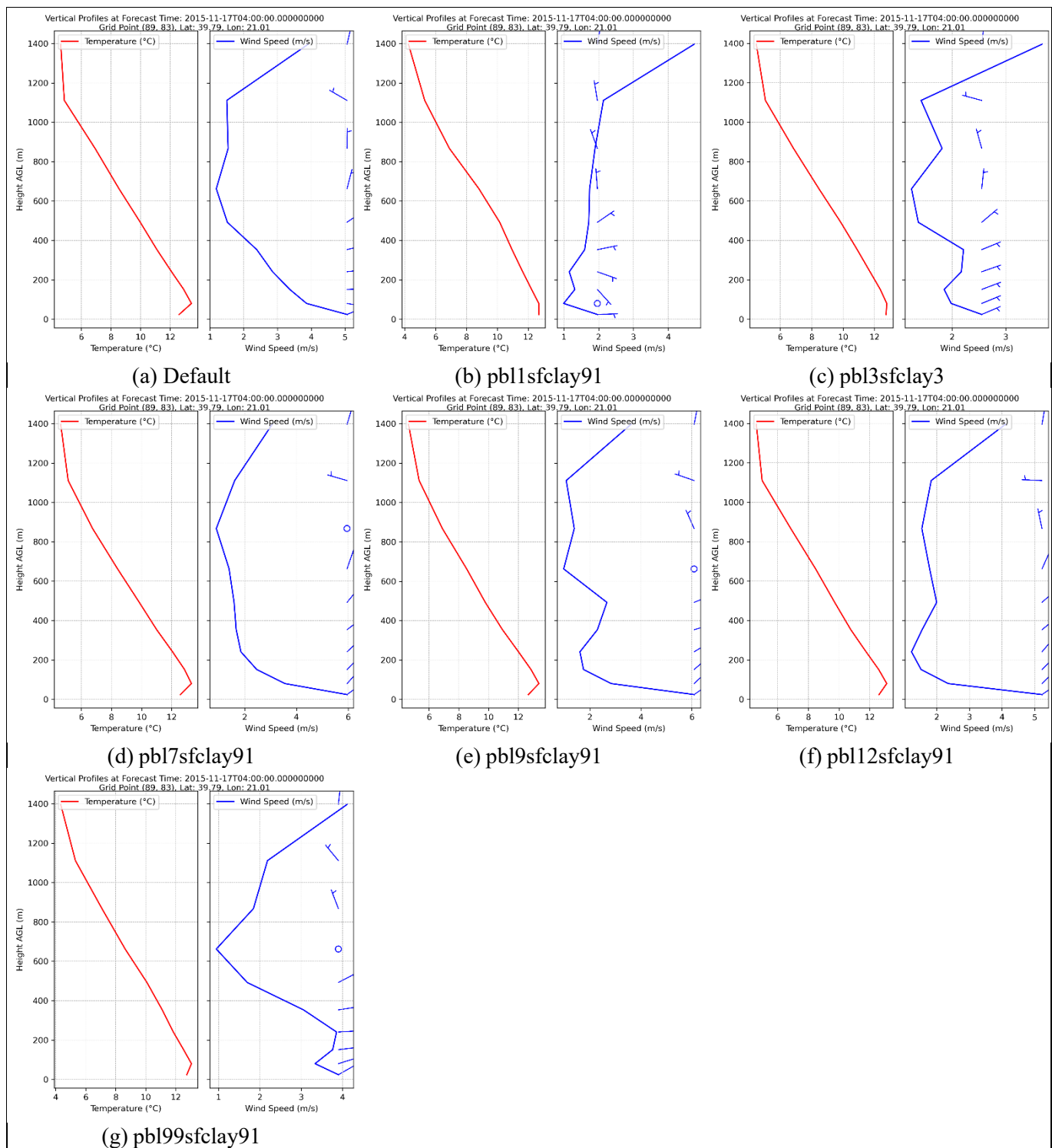
Σχήμα Γ6. Όπως στο Σχήμα Γ1, αλλά για το πλησιέστερο πλεγματοτικό σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό Ιωαννίνων.



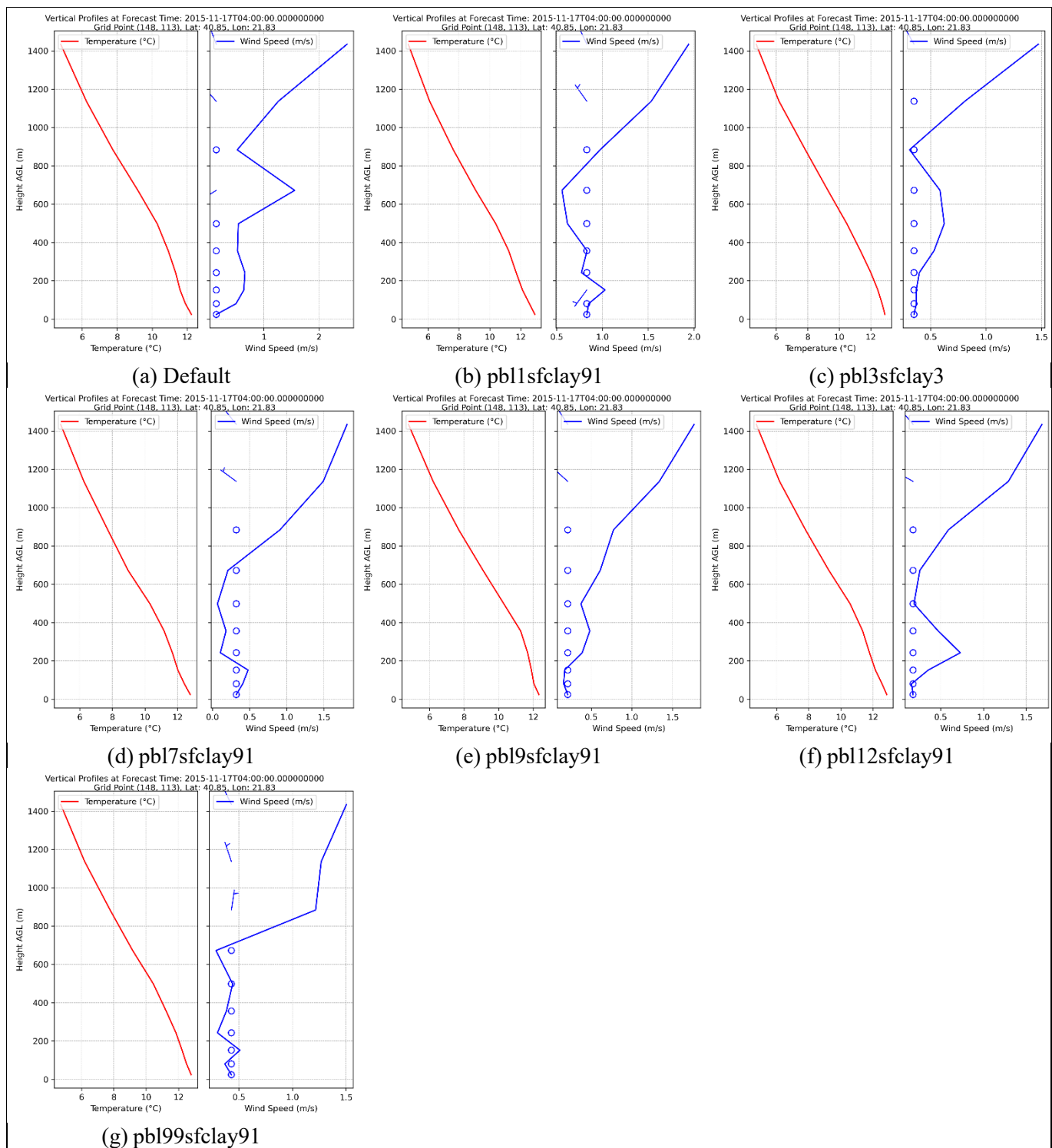
Σχήμα Γ7. Όπως στο Σχήμα Γ1, αλλά για το πλησιέστερο πλεγματικό σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό Καρπενησίου.



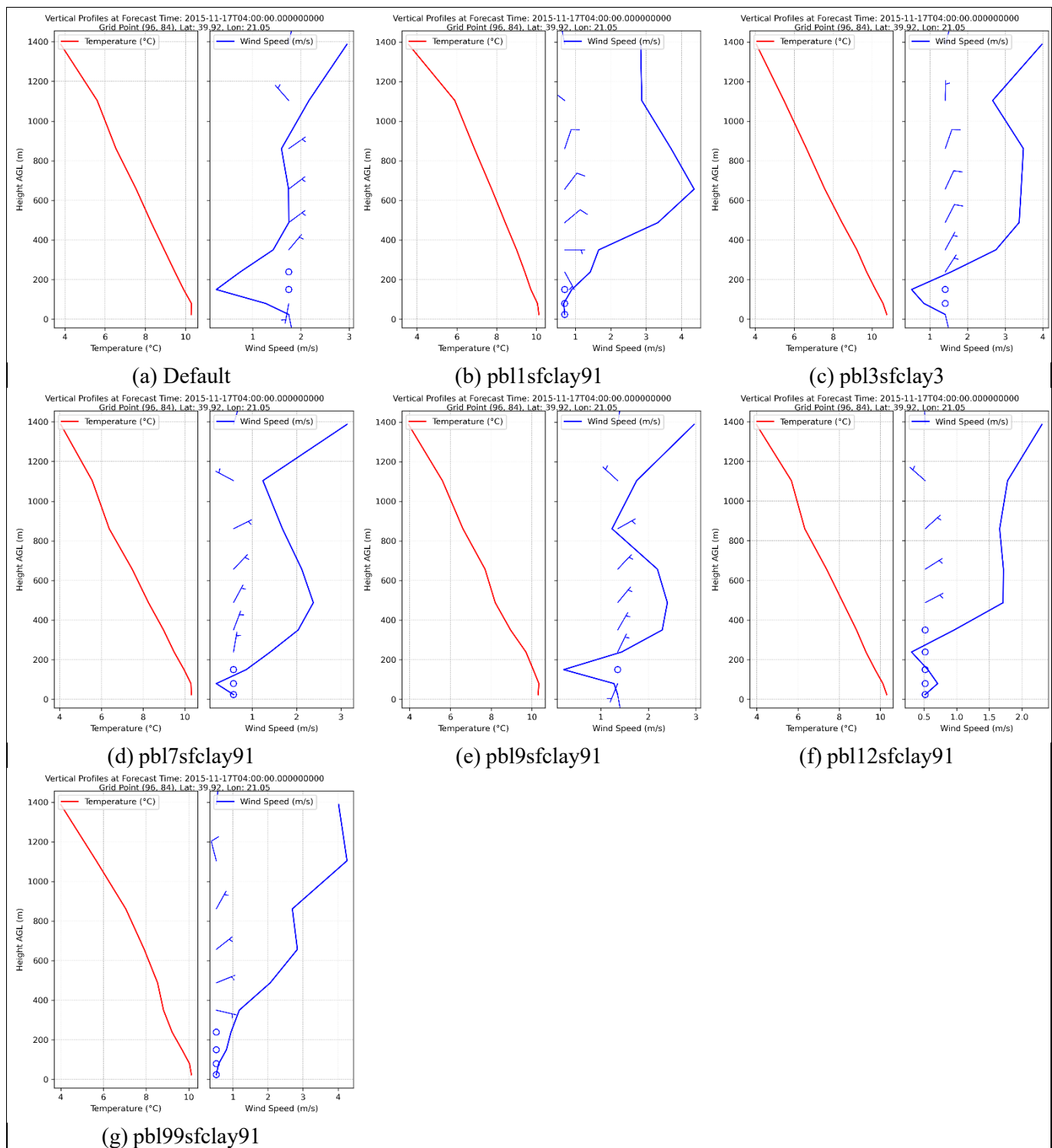
Σχήμα Γ8. Όπως στο Σχήμα Γ1, αλλά για το πλησιέστερο πλεγματικό σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό Τρικάλων.



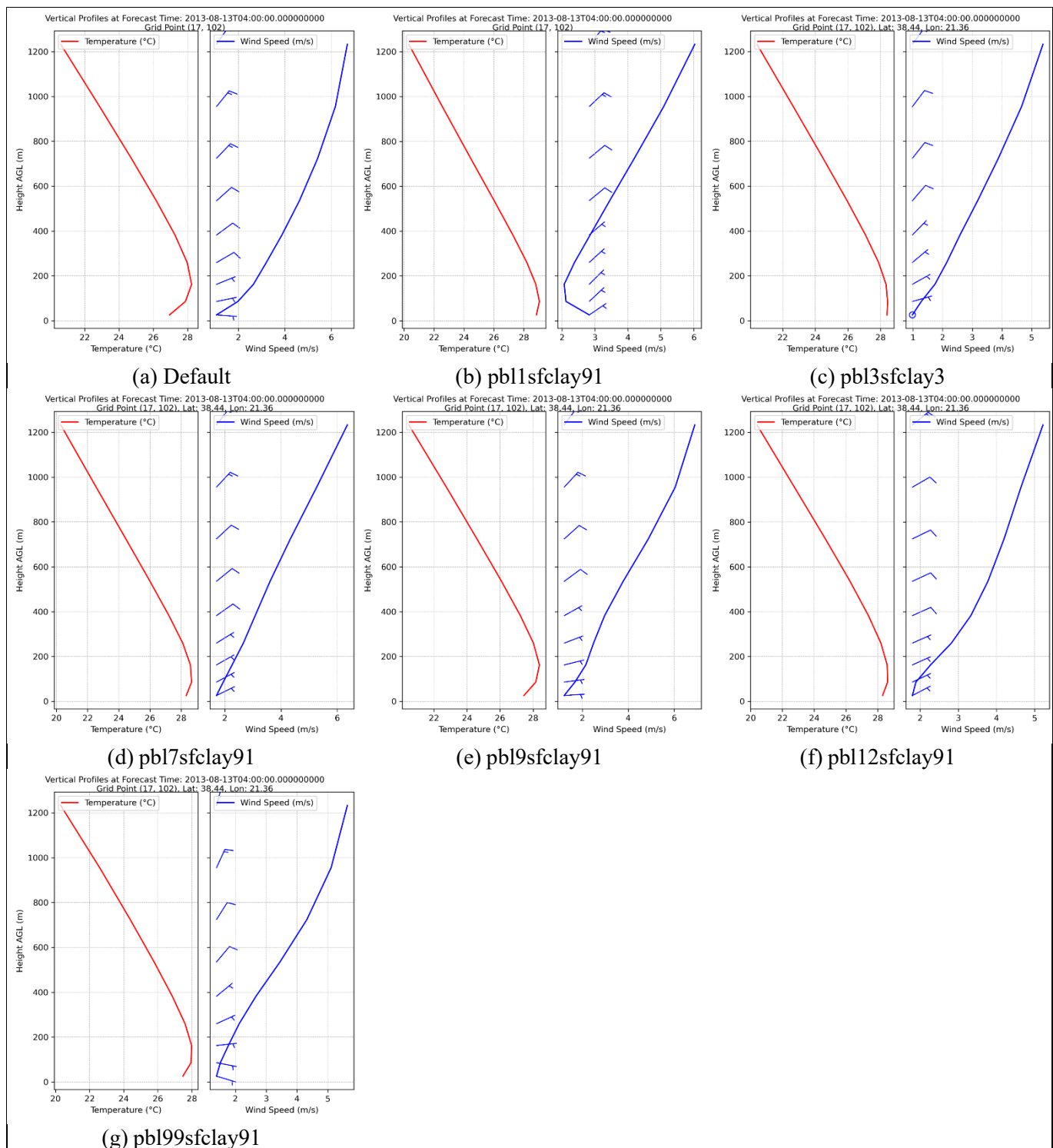
Σχήμα Γ9. Όπως στο Σχήμα Γ1, αλλά για το πλησιέστερο πλεγματικό σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό Τρίστενου.



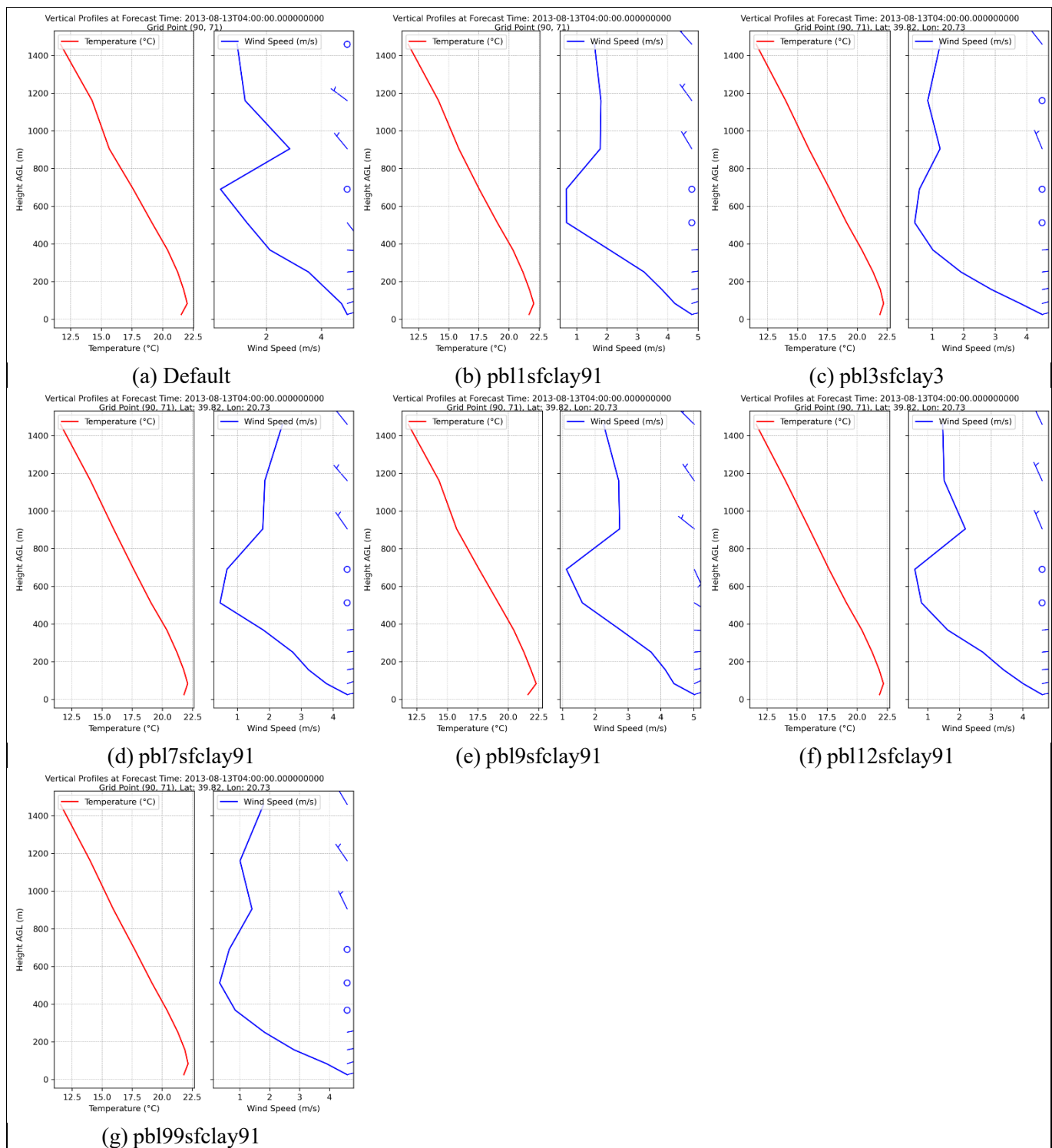
Σχήμα Γ10. Όπως στο Σχήμα Γ1, αλλά για το πλησιέστερο πλεγματικό σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό Βεγορίτιδας.



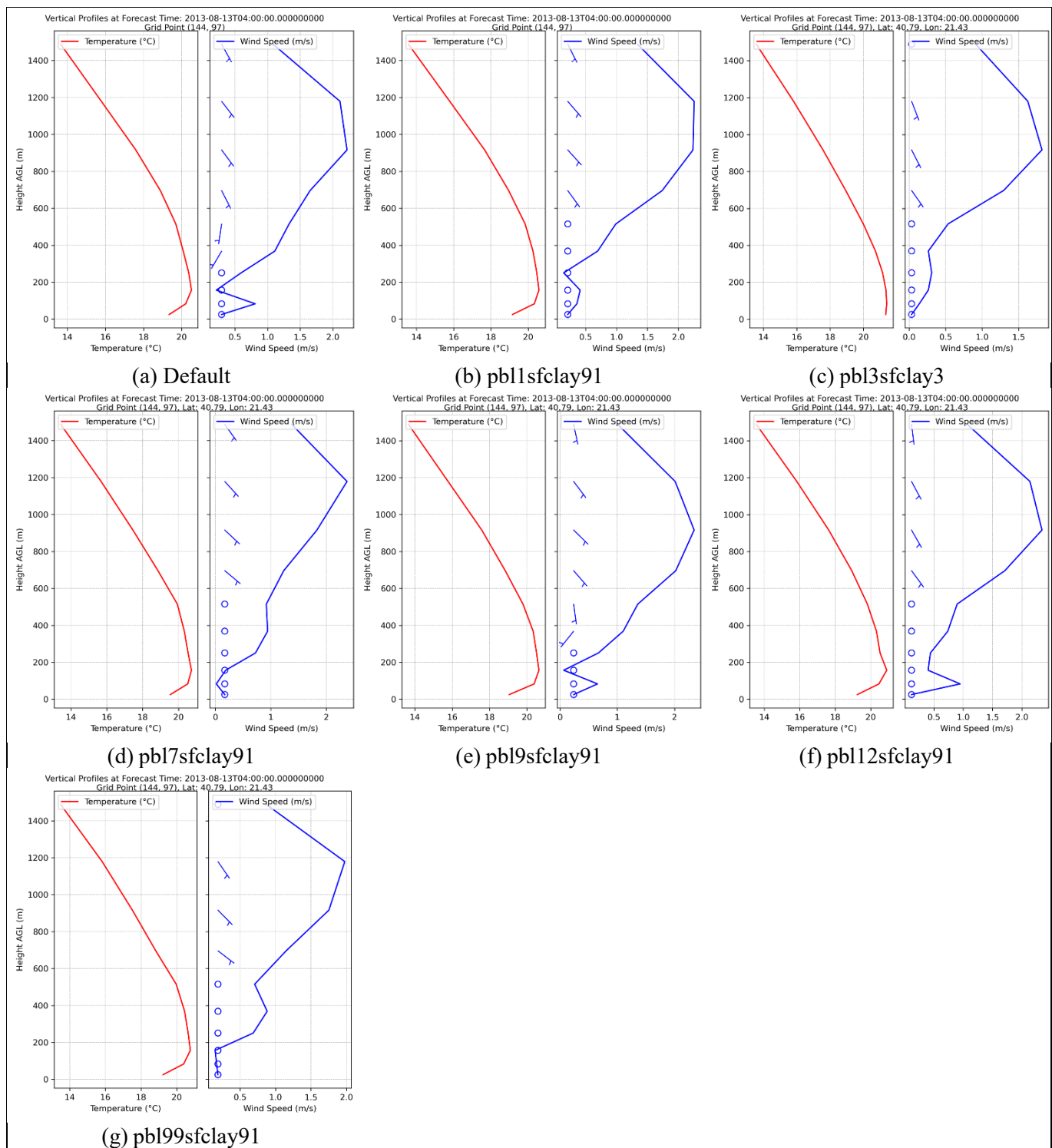
Σχήμα Γ11. Όπως στο Σχήμα Γ1, αλλά για το πλησιέστερο πλεγματικό σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό Βοβούσας.



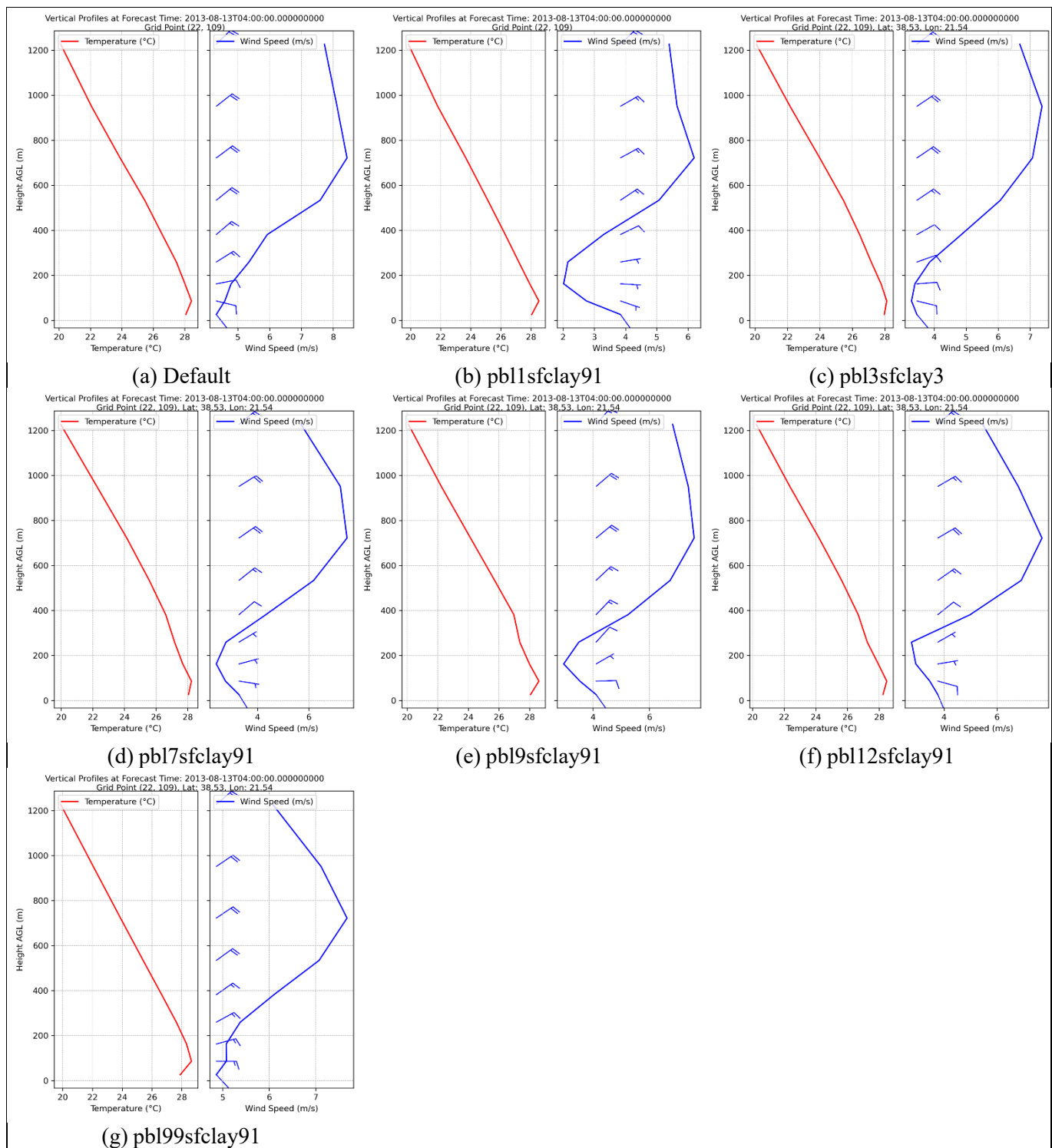
Σχήμα Γ12. Κατανομές θερμοκρασίας (°C) και ταχύτητας ανέμου (m/s) καθ' ύψος στις 04 UTC της πλησιέστερης ημέρας στο κέντρο της συστάδας του WT10 για το πλησιέστερο πλεγματοειδές σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό Αιτωλικού, για τις προεπιλεγμένες και διάφορες φυσικές παραμετροποιήσεις.



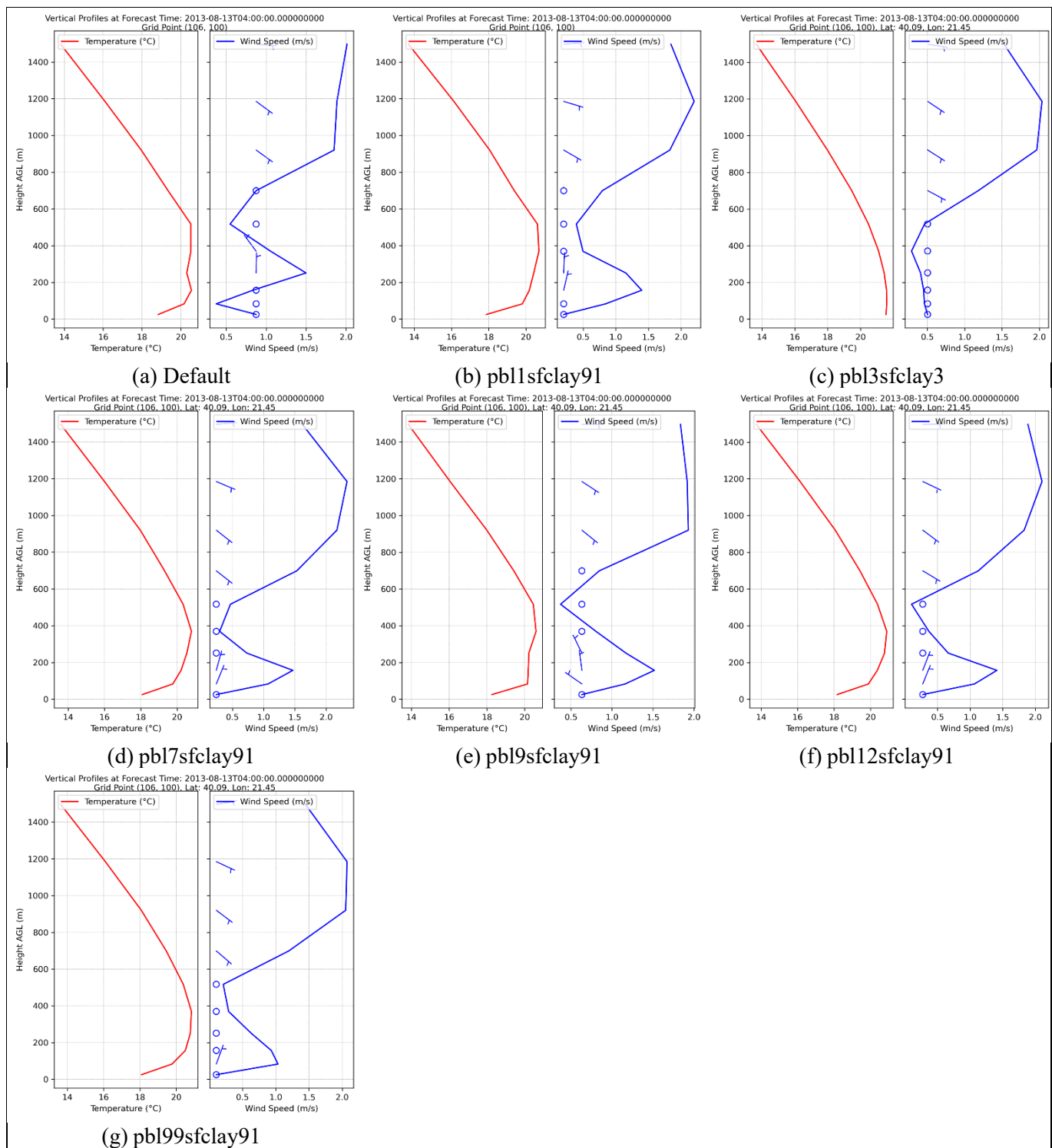
Σχήμα Γ13. Όπως στο Σχήμα Γ12, αλλά για το πλησιέστερο πλεγματικό σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό Ασπραγέλων.



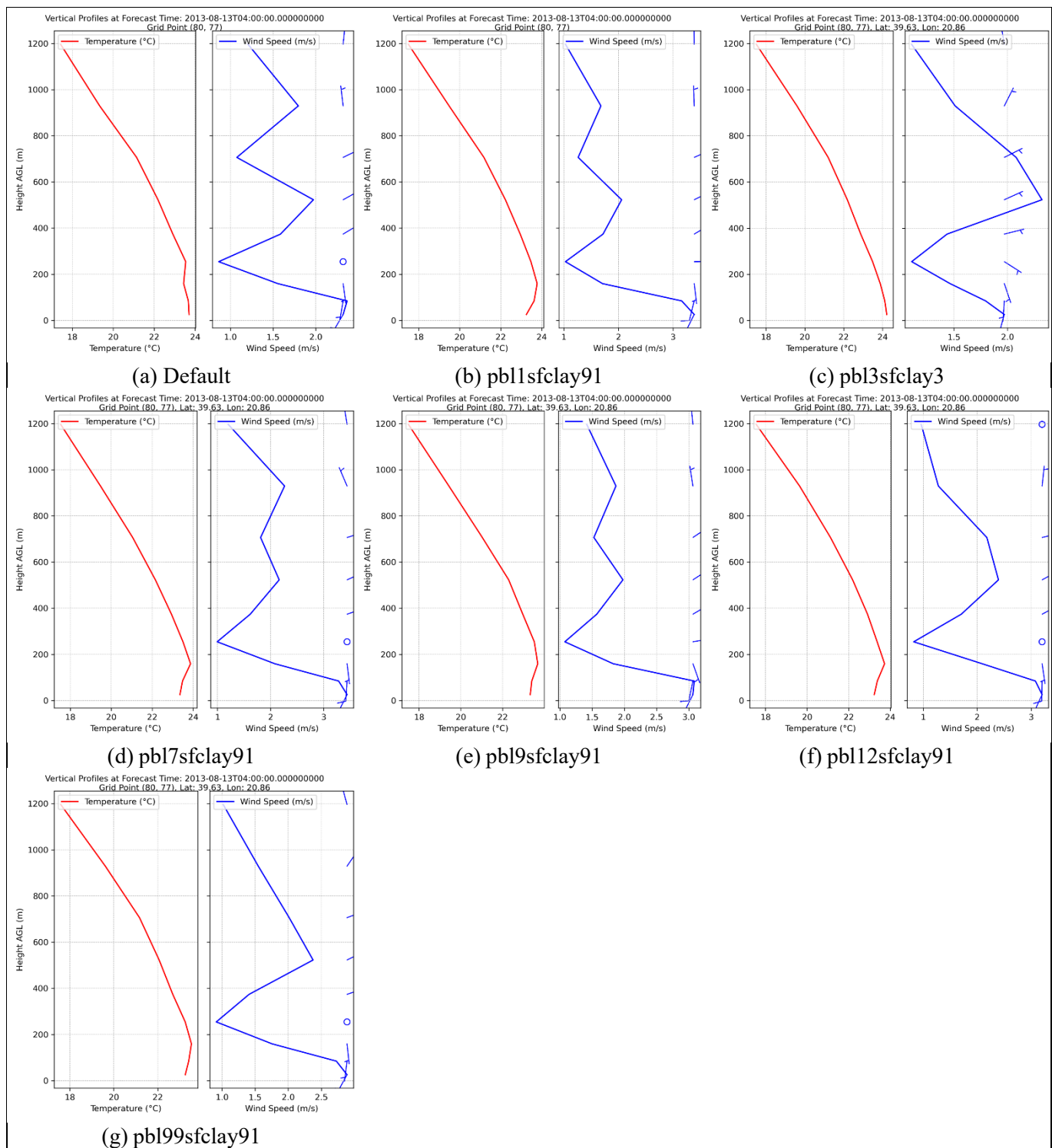
Σχήμα Γ14. Όπως στο Σχήμα Γ12, αλλά για το πλησιέστερο πλεγματικό σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό Φλώρινας.



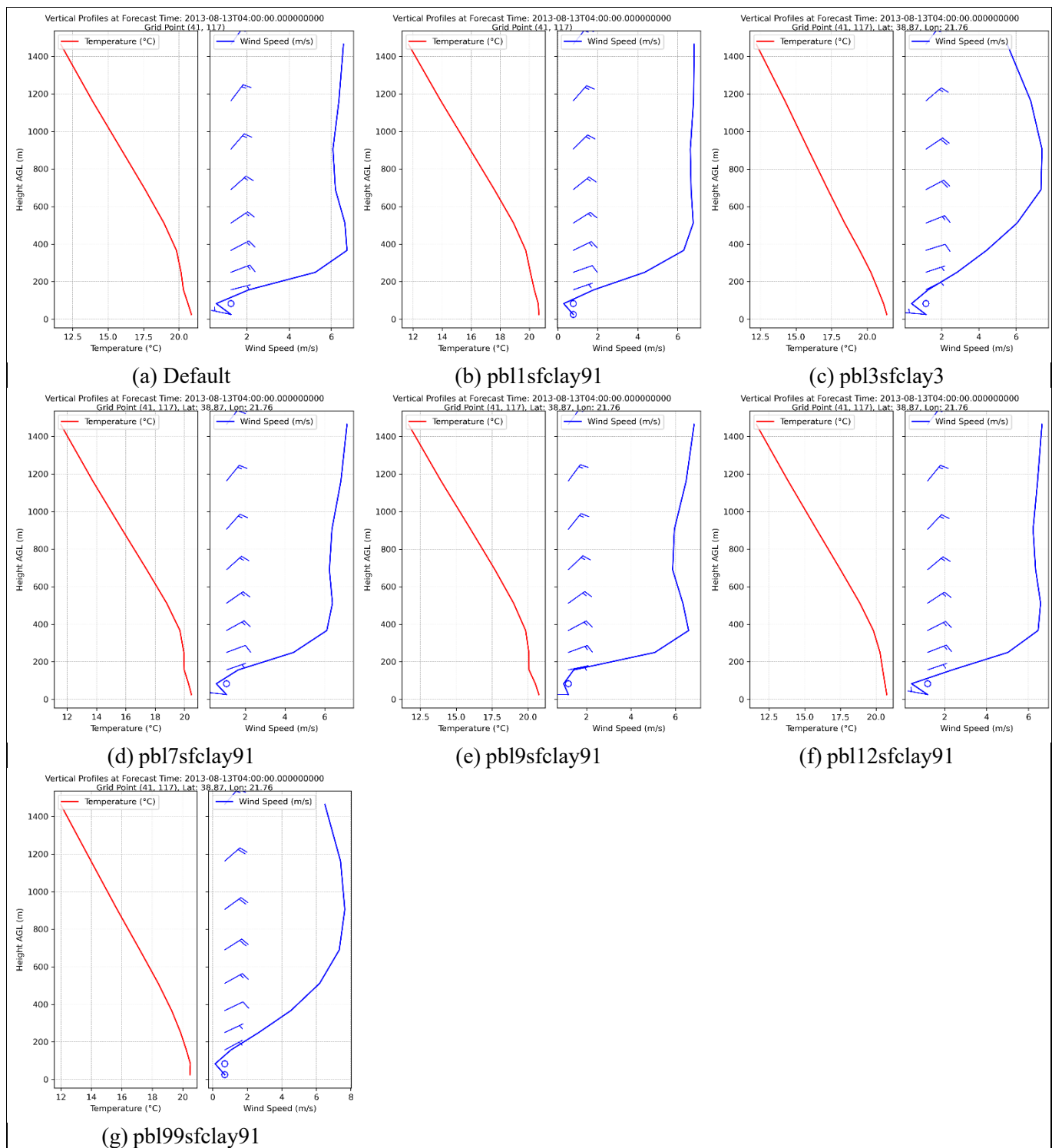
Σχήμα Γ15. Όπως στο Σχήμα Γ12, αλλά για το πλησιέστερο πλεγματικό σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό Γαβαλούς.



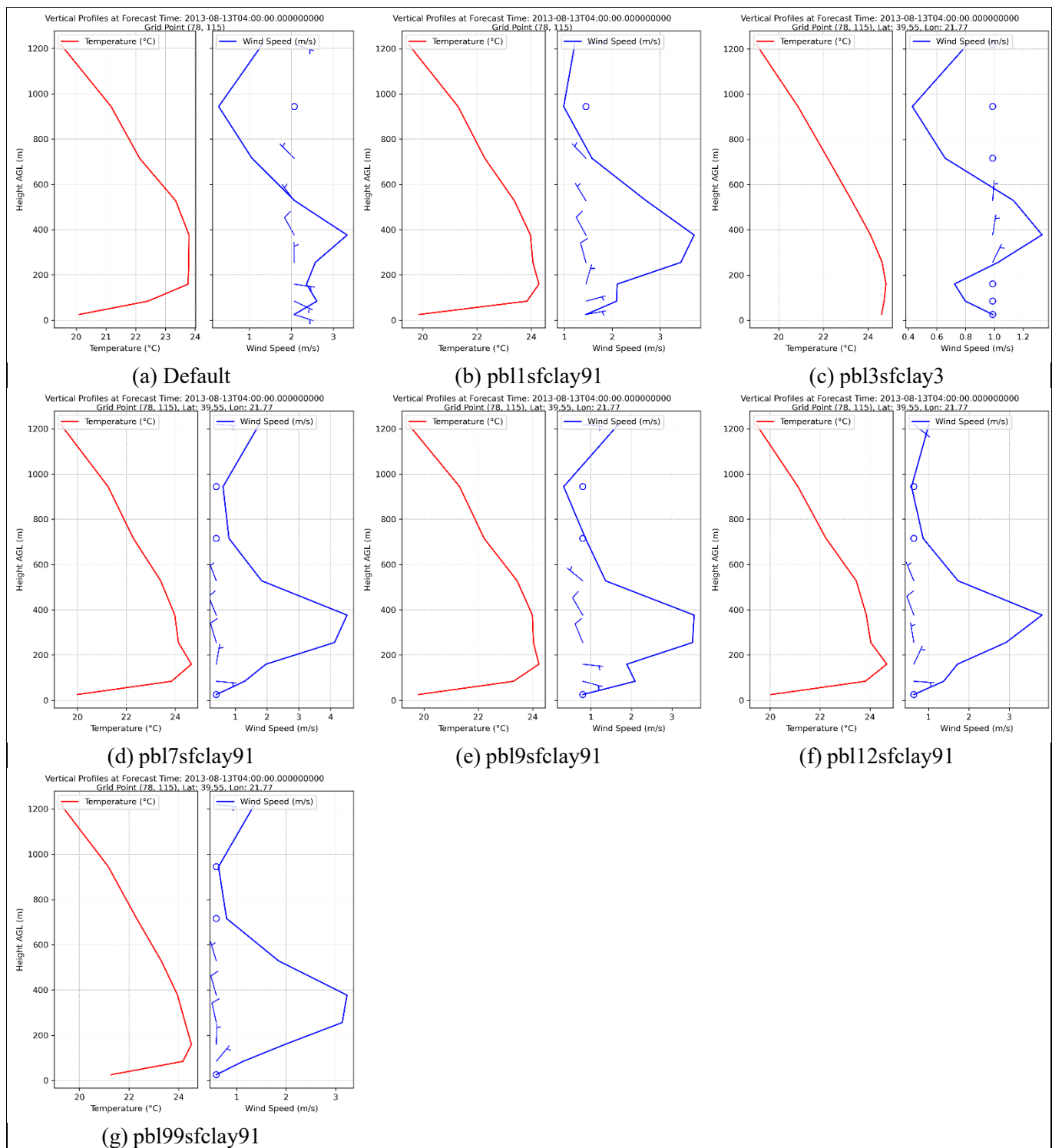
Σχήμα Γ16. Όπως στο Σχήμα Γ12, αλλά για το πλησιέστερο πλεγματικό σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό Γρεβενών.



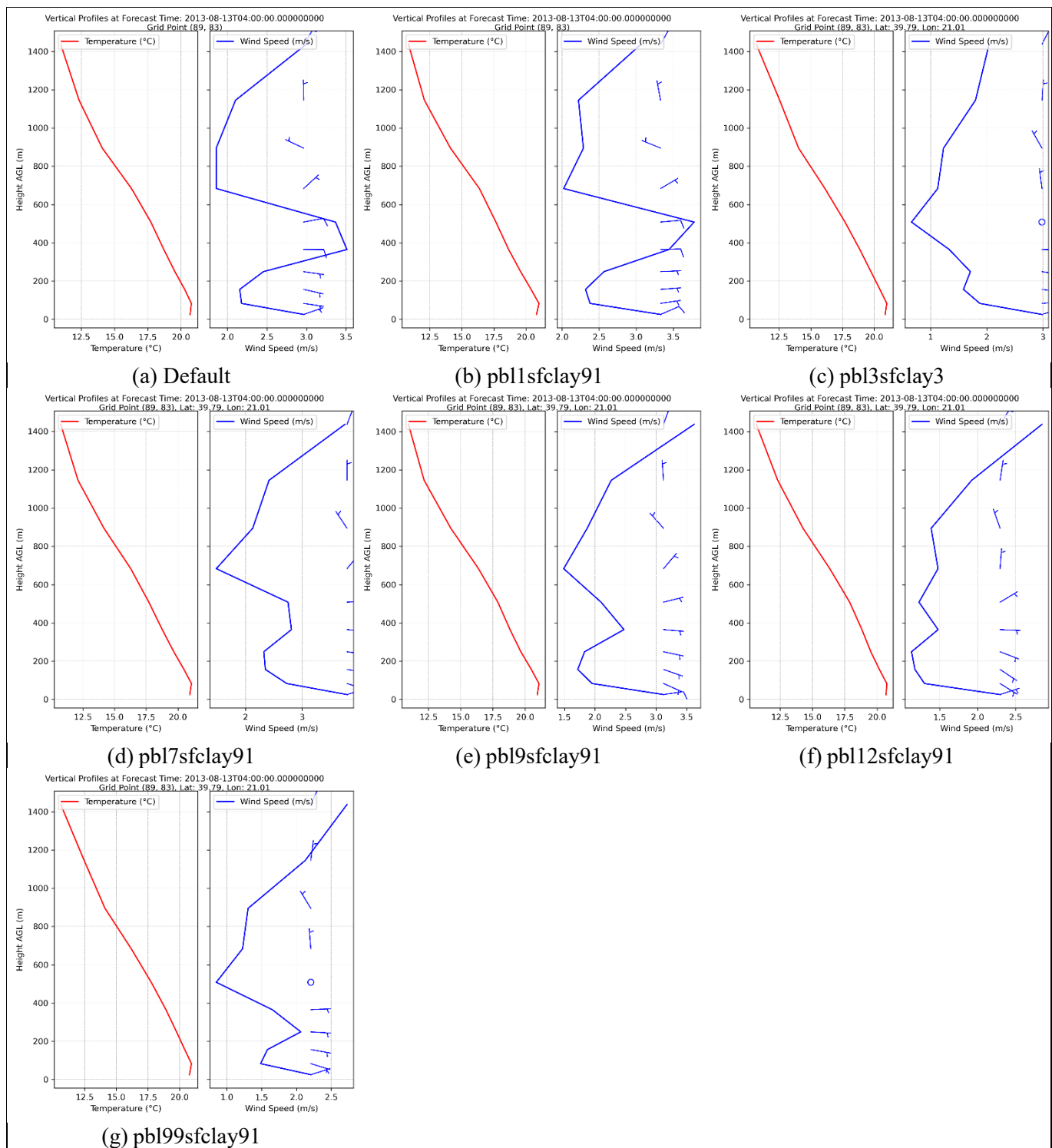
Σχήμα Γ17. Όπως στο Σχήμα Γ12, αλλά για το πλησιέστερο πλεγματικό σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό Ιωαννίνων.



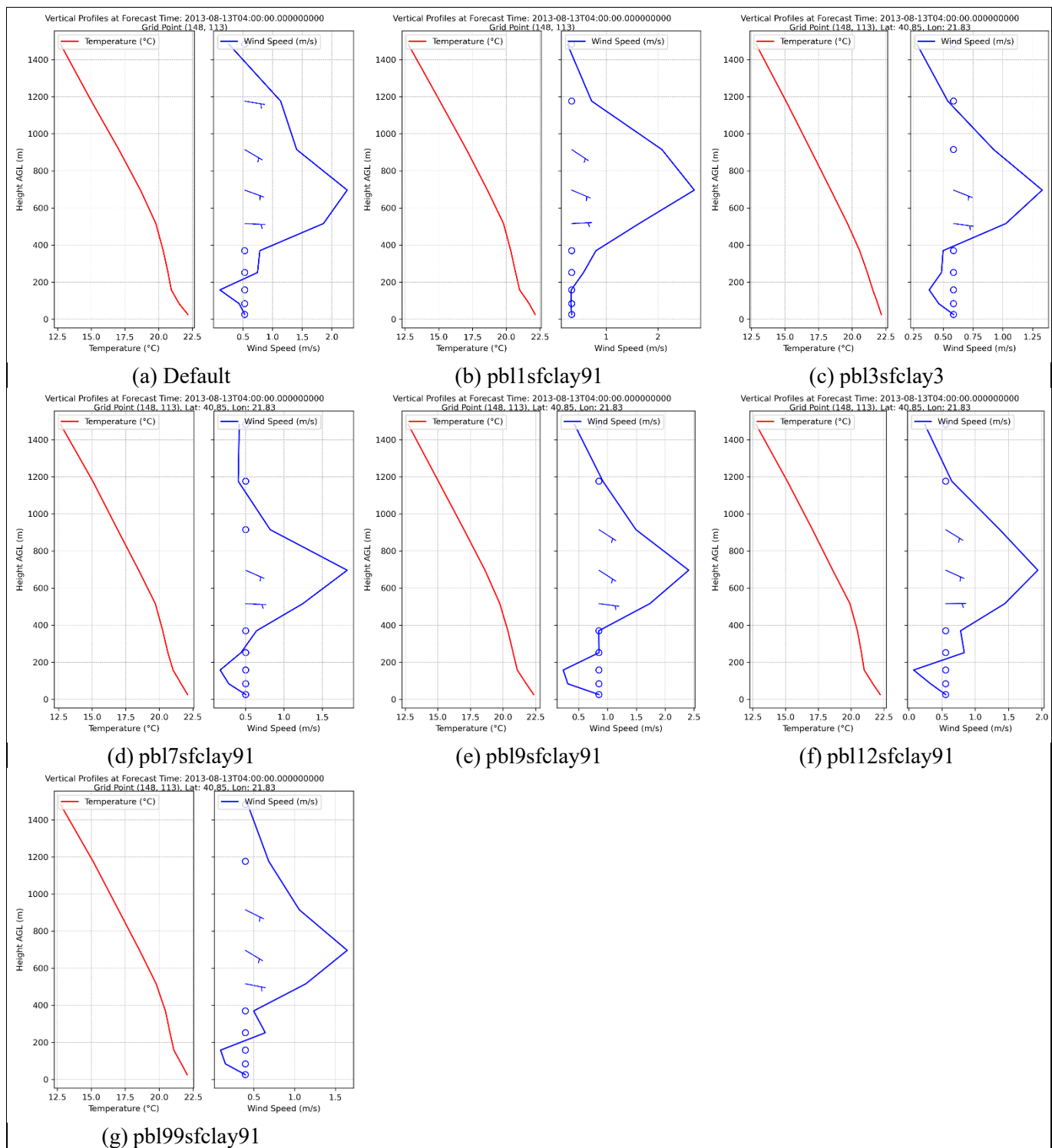
Σχήμα Γ18. Όπως στο Σχήμα Γ12, αλλά για το πλησιέστερο πλεγματικό σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό Καρπενησίου.



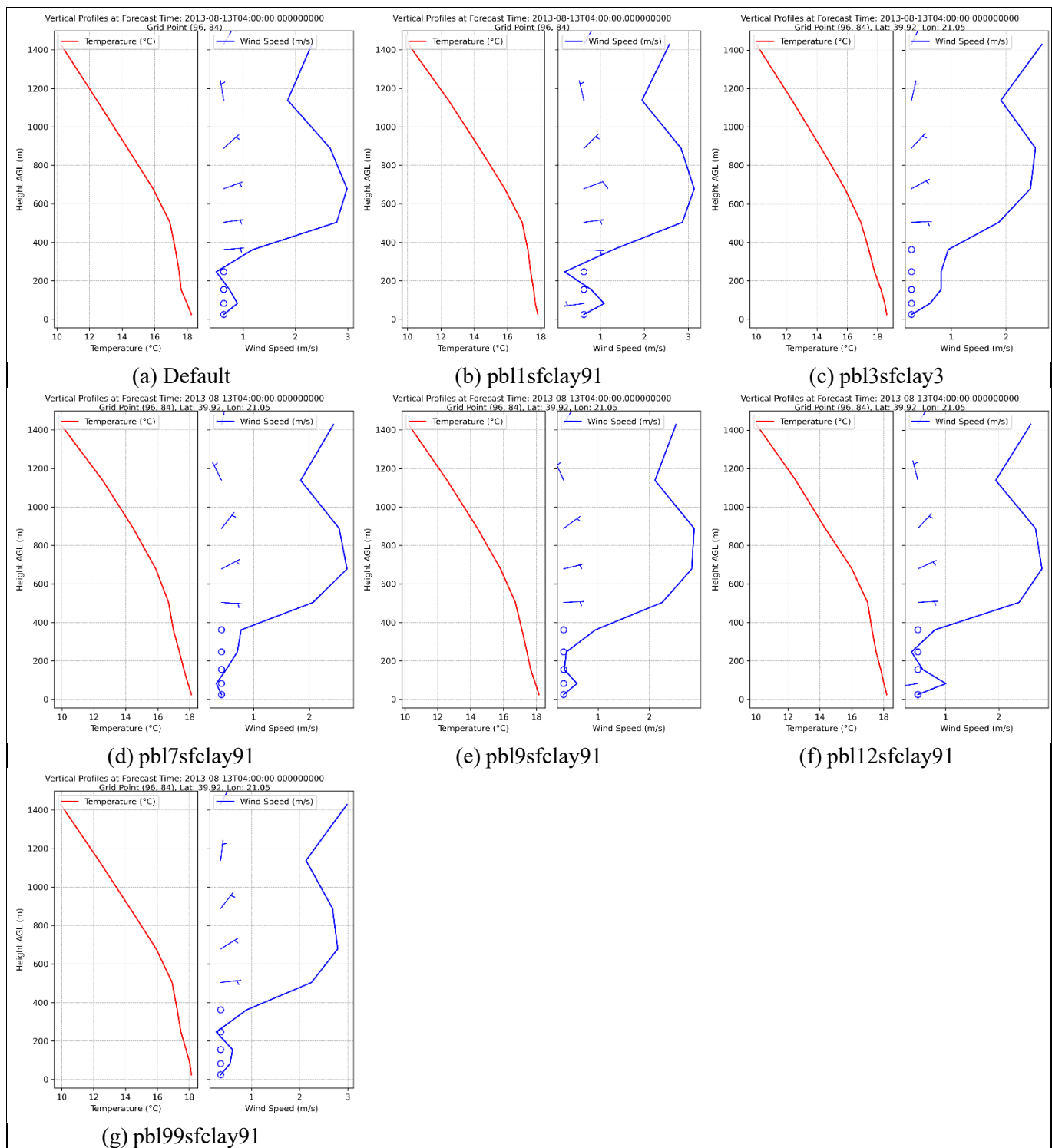
Σχήμα Γ19. Όπως στο Σχήμα Γ12, αλλά για το πλησιέστερο πλεγματικό σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό Τρικάλων.



Σχήμα Γ20. Όπως στο Σχήμα Γ12, αλλά για το πλησιέστερο πλεγματικό σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό Τρίστενου.



Σχήμα Γ21. Όπως στο Σχήμα Γ12, αλλά για το πλησιέστερο πλεγματικό σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό Βεγορίτιδας.



Σχήμα Γ22. Όπως στο Σχήμα Γ12, αλλά για το πλησιέστερο πλεγματικό σημείο στον μετεωρολογικό σταθμό Βοβούσας.