

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: ΣΟΥΠΙΑΔΟΥ ANNA

ΤΙΤΛΟΣ:

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΤΙΣ ΚΑΙΡΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΝ ΠΟΛΗ ΤΩΝ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΠΜΣ-Ατμοσφαιρικές Επιστήμες και Περιβάλλον

Τμήμα Φυσικής

Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
<<ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ>>

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ
ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΤΙΣ ΚΑΙΡΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΝ
ΠΟΛΗ ΤΩΝ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΣΟΥΠΙΑΔΟΥ ANNA

ΑΜ: 799

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΛΩΛΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2023

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract.....	4
Λίστα ακρωνυμίων.....	5
Κεφάλαιο 1- Εισαγωγή.....	6
1.1 Καιρός-Τύποι καιρού.....	6
1.2 Ρύποι-Ρύπανση.....	9
1.3 Μετεωρολογικές παράμετροι και ατμοσφαιρικοί ρύποι.....	17
1.4 Στόχος και δομή της διπλωματικής εργασίας.....	21
Κεφάλαιο 2 - Δεδομένα και Μεθοδολογία.....	22
2.1 Δεδομένα.....	22
2.2 Μεθοδολογία.....	25
2.2.1 Παραγοντική Ανάλυση (Factor Analysis, FA).....	25
2.2.2 Ανάλυση κατά Συστάδες (Cluster Analysis CA).....	27
2.3 Εφαρμογή της μεθοδολογίας στην παρούσα εργασία.....	30
2.3.1 Εφαρμογή της Παραγοντικής Ανάλυσης.....	30
2.3.2 Εφαρμογή της Ανάλυσης κατά Συστάδες <i>k-means</i>	34
2.3.3 Επεξεργασία των δεδομένων ρύπανση.....	36
Κεφάλαιο 3 – Αποτελέσματα.....	38
3.1 Τύποι καιρού και επίπεδα ρύπανσης	38
3.2 Υπερβάσεις οριακών τιμών συγκεντρώσεων ρύπων.....	71
3.3 Εξέλιξη συγκέντρωσης ρύπων για περιπτώσεις συνεχόμενων ημερών επικράτησης του ίδιου τύπου καιρού.....	77
Κεφάλαιο 4 – Συμπεράσματα.....	84
Βιβλιογραφία.....	86

Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, ερευνήθηκε για την τριετία 15/2/2019-14/2/2022 η εξάρτηση των επιπέδων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τις συνοπτικές συνθήκες που επικρατούν στην πόλη των Ιωαννίνων. Η περίοδος της μελέτης περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα ποιοτικών μετρήσεων της τοπικής ρύπανσης του αέρα (σωματίδια και αέρια). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούνται από: 1) ημερήσιες τιμές σε σημεία πλέγματος $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ των γεωδυναμικών υψών 500hPa και 1000hPa και της θερμοκρασίας αέρα 850hPa στη νοτιοανατολική Ευρώπη (30°N - 55°N , 0° - 40°E), που ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων ERA5 Reanalysis, 2) ημερήσιες τιμές (00, 06, 12 και 18 UTC) σε σημεία πλέγματος $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ θερμοκρασίας αέρα και σημείου δρόσου στα 2m, ζωνικής και μεσημβρινής συνιστώσας ανέμου στα 10m και ολικής νέφωσης στην ευρύτερη περιοχή της Ηπείρου (38.5°N - 40.5°N , 19.5°E - 21.5°E), που ελήφθησαν από την βάση δεδομένων ERA5 Reanalysis και 3) ωριαίες τιμές θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου και συγκέντρωσης βασικών ρύπων (PM₁, PM_{2,5}, PM₄, PM₁₀, NO, NO₂, NO_x, CO, SO₂ και O₃), που καταγράφηκαν στον αυτόματο περιβαλλοντικό σταθμό της Περιφέρειας Ηπείρου ο οποίος βρίσκεται στο κέντρο των Ιωαννίνων. Αρχικά, ορίζονται 12 τύποι καιρού σε ημερήσια βάση, εφαρμόζοντας μια πολυμεταβλητή στατιστική μεθοδολογία, η οποία περιλαμβάνει τις μεθόδους Παραγοντική Ανάλυση και Ανάλυση κατά Συστάδες στα μετεωρολογικά δεδομένα. Στη συνέχεια, για κάθε τύπο καιρού υπολογίζονται οι μέσες τιμές, οι τυπικές αποκλίσεις και οι μέσες ημερήσιες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των ρύπων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, φαίνεται ότι σχεδόν όλες οι συγκεντρώσεις ρύπων είναι σημαντικά υψηλότερες κατά τη διάρκεια δύο αντικυκλωνικών τύπων καιρού που επικρατούν την ψυχρή περίοδο του έτους, ενώ οι ημερήσιες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων επηρεάζονται από τις ημερήσιες διακυμάνσεις της κυκλοφορίας, των καύσεων και της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ακριβής επίδραση των παραπάνω παραγόντων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του επικρατούντος τύπου καιρού.

Abstract

The dependence of the atmospheric pollution levels on the synoptic conditions and the associated prevailing weather regimes over Ioannina is examined for the 3-year period 15/2/2019-14/2/2022. The study period is constrained by the availability of quality local air (particulate and gaseous) pollution measurements. The data used consist of: 1) daily $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ grid point values of 500hPa and 1000hPa geopotential heights and 850hPa air temperature over southeastern Europe (30°N - 55°N , 0° - 40°E), obtained from the ERA5 Reanalysis database, 2) daily $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ grid point values (00, 06, 12 and 18 UTC) of air temperature and dew point at 2m, zonal and meridional wind components at 0m and total cloud cover over the greater Epirus region (38.5°N - 40.5°N , 19.5°E - 21.5°E), obtained from ERA5 Reanalysis database and 3) hourly values of air temperature, relative humidity, wind speed and direction and the concentration of basic pollutants (PM₁₀, PM₄, PM_{2.5}, PM₁, NO, NO₂, NO_x, CO, SO₂ and O₃) recorded at the automatic environmental station of the Epirus Region located at the center of Ioannina. At first, 12 Weather Types (WTs) are defined on daily basis applying a multivariate statistical methodology including Factor Analysis and k-means Cluster Analysis on the meteorological data. Next, for each WT, the average values, the standard deviations and the mean diurnal variations of the pollutant concentrations are calculated. According to the results, it appears that almost all pollutant concentrations are considerably higher during two anticyclonic WTs prevailing in the cold period of the year, while the diurnal variations of the concentrations are affected by the diurnal variations of traffic, combustion processes and solar radiation. The exact influence of the above factors depends on the characteristics of the prevailing WT.

Πίνακας Ακρωνυμίων

ΑΚΡΩΝΥΜΙΟ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
CA	Cluster Analysis, Ανάλυση κατά Συστάδες
CO	Carbon Monoxide, Μονοξείδιο του Άνθρακα
CO ₂	Carbon Dioxide, Διοξείδιο του Άνθρακα
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού
FA	Factor Analysis, Παραγοντική Ανάλυση
NO	Nitrogen Monoxide, Μονοξείδιο του Αζώτου
NO ₂	Nitrogen Dioxide, Διοξείδιο του Αζώτου
NO _x	Nitric oxide, Οξείδια του Αζώτου
O ₃	Ozone, Όζον
PM1,PM2.5,PM4,PM10	Particulate Matters, Αιωρούμενα σωματίδια
SO ₂	Sulfur Dioxide, Διοξείδιο του Θείου
UTC	Coordinated Universal Time, Παγκόσμια Συντονισμένη Ωρα
VOCs	Volatile Organic Compounds, Πτητικές οργανικές ενώσεις
W.H.O.	World Health Organization, Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας
WT	Weather Type, Τύπος Καιρού

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Καιρός-Τύποι καιρού

Η κατάσταση της ατμόσφαιρας πάνω από μία περιοχή, για μια ορισμένη χρονική στιγμή, συμπεριλαμβανομένης και της εξέλιξης αυτής, ονομάζεται καιρός. Η κατανομή του καιρού, πάνω στην επιφάνεια της γης, σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή μπορεί να δώσει μια μεγάλη ποικιλία καιρικών καταστάσεων, και συνεπώς έχει μεγάλη γεωγραφική σημασία. Στην πράξη, ο καιρός αντιπροσωπεύει ουσιαστικά τη μεταβολή από μέρα σε μέρα κατάστασης της ατμόσφαιρας, και πιο συγκεκριμένα, τις μεταβολές θερμοκρασίας, υγρασίας, κίνησης του αέρα, κλπ.

Η μέση καιρική κατάσταση, δηλαδή η σύνθεση του καιρού για μια μεγάλη σχετικά χρονική περίοδο ονομάζεται κλίμα. Το κλίμα είναι ανεξάρτητο από οποιοδήποτε στιγμιαία κατάσταση.

Ένας από τους βασικούς στόχους, ώστε να επιτευχθεί η καταγραφή του κλίματος για μια συγκεκριμένη περιοχή, είναι η κατηγοριοποίηση των καιρικών συστημάτων σε χωροχρονική κλίμακα. Μέσω της μελέτης των αλλαγών στα πρότυπα της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, τη συχνότητα και το χαρακτήρα των αερίων μαζών, καθώς και τη σημασία των ακραίων καιρικών φαινομένων, οι συνοπτικοί κλιματολόγοι μπορούν να βελτιώσουν την κατανόηση για την ανάλυση του κλίματος μιας περιοχής (Kalkstein and Davis 1990).

Ο γενικός στόχος κάθε συνοπτικής κλιματολογικής μεθοδολογίας, είναι ο συνδυασμός μεμονωμένων καιρικών στοιχείων σε ομάδες ή και τάξεις (classes) που να είναι αντιπροσωπευτικές της κατάστασης της συνοπτικής κλίμακας, σε μια συγκεκριμένη στιγμή στον χρόνο (Kalkstein and Davis 1990). Αυτές οι ομάδες, έπειτα, μπορούν να σχετίζονται με κάποια περιβαλλοντική παράμετρο, η μεταβλητότητα της οποίας εξαρτάται από τις διάφορες καταστάσεις της ατμόσφαιρας σε διαφορετικούς χρόνους.

Ένα σημαντικό αποτέλεσμα της συνοπτικής προσέγγισης είναι ότι η περιβαλλοντική παράμετρος που μελετάται δε σχετίζεται μόνο με αλλαγές σε ένα μεμονωμένο καιρικό στοιχείο, αλλά με το σύνολο των καιρικών στοιχείων ή τη λεγόμενη συνοπτική καιρική κατάσταση (Kalkstein and Davis 1990).

Συγκεκριμένα, σε ότι αφορά το κλίμα της Ελλάδας, αυτό χαρακτηρίζεται εύκρατο. Η Ελλάδα ανήκει στη βόρεια εύκρατη ζώνη (με βόρειο γεωγραφικό πλάτος από 34° 48' ως 41° 45') και βρέχεται από την Ανατολική Μεσόγειο. Βρίσκεται στη λεκάνη της Μεσογείου και παρουσιάζει, όπως όλες οι παραμεσόγειες περιοχές, ορισμένες ιδιομορφίες και έτσι το κλίμα της χαρακτηρίζεται ως μεσογειακό. Με άλλα λόγια, επικρατούν ήπιοι και υγροί χειμώνες, και αντίστοιχα σχετικά θερμά και ξηρά καλοκαίρια, με μεγάλη ηλιοφάνεια σχεδόν όλο τον χρόνο.

Ωστόσο, στις διάφορες περιοχές της Ελλάδας παρουσιάζεται μια σχετικά μεγάλη ποικιλία κλιματικών τύπων. Συναντώνται κλιματικές διαφορές, ακόμη και σε τοποθεσίες που απέχουν μικρή απόσταση μεταξύ τους (Kostoroulou 2003). Αυτό οφείλεται, κυρίως, στο ανάγλυφο της χώρας που παρουσιάζει έντονες υψομετρικές

διαφορές (μεγάλες οροσειρές, πλήθος ορεινών όγκων), αλλά και στις θαλάσσιες εκτάσεις.

Οι κύριοι παράγοντες που διαμορφώνουν και καθορίζουν το κλίμα στην Ελλάδα είναι:

- Το γεωγραφικό πλάτος: Η Ελλάδα, όντας στην εύκρατη ζώνη και λόγω της θέσης που έχει, παρουσιάζει σχετικά μεγάλη ηλιοφάνεια. Το νότιο τμήμα της είναι προφανώς θερμότερο από το βόρειο.
- Το υψόμετρο, το ανάγλυφο και ο προσανατολισμός των κλιτύων: Η Ελλάδα είναι η τρίτη πιο ορεινή χώρα της Ευρώπης. Το κλίμα σε μεγάλα υψόμετρα είναι αρκετά πιο ψυχρό από αυτό σε πεδινές περιοχές. Περιοχές που βρίσκονται στην προσήνεμη πλευρά της οροσειράς της Πίνδου χαρακτηρίζονται από μεγάλα ποσά βροχής σε σχέση με περιοχές που βρίσκονται στην υπήνεμη πλευρά της.
- Η απόσταση από την θάλασσα: Κάθε περιοχή της Ελλάδας απέχει από τη θάλασσα το πολύ 150 χιλιόμετρα, ενώ το μήκος των ακτών της ξεπερνά τα 15000 χιλιόμετρα. Η επίδραση της θάλασσας είναι καθοριστική στην διαμόρφωση του κλίματος, καθώς συμβάλει στη διακύμανση της θερμοκρασίας τόσο τη χειμερινή όσο και τη θερινή περίοδο.
- Ειδικές τοπικές συνθήκες: Σε ορισμένες περιοχές της Ελλάδας πνέουν τοπικοί άνεμοι. Χαρακτηριστικός νοτιοδυτικός θερμός και ξηρός άνεμος το καλοκαίρι είναι ο λίβας, ενώ ο βαρδάρης που πνέει κατά μήκος της κοιλάδας του Αξιού, είναι βόρειος και ξηρός άνεμος. Το καλοκαίρι πνέουν στο Αιγαίο οι ετησίες, γνωστοί αλλιώς και ως μελτέμια (Kostoroulou 2003).
- Η έρημος Σαχάρα και η Σιβηρία: Η Σαχάρα είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία θερμών και ξηρών αέριων μαζών που κάνουν ηπιότερο, κυρίως τον χειμώνα, το κλίμα των περιοχών που επηρεάζουν, ενώ το καλοκαίρι συνδέονται με επεισόδια έντονου καύσωνα. (Avila et al. 1997, Prezerakos 1997, Prezerakos et al. 2010). Η Σιβηρία είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία ξηρών, πολύ ψυχρών αέριων μαζών, οι οποίες επηρεάζουν κατά τη διάρκεια του χειμώνα την ελληνική περιοχή, όταν δημιουργείται επέκταση του Σιβηρικού αντικυκλώνα προς τα δυτικά.

Ειδικότερα για την περιοχή των Ιωαννίνων, η περιοχή μελέτης μας βρίσκεται στην βορειοδυτική Ελλάδα και πιο συγκεκριμένα, ανήκει στο γεωγραφικό διαμέρισμα της Ηπείρου με γεωγραφικό πλάτος $39^{\circ} 40'$, γεωγραφικό μήκος $20^{\circ} 51'$ και μέσο υψόμετρο 483 μέτρα. Το λεκανοπέδιο των Ιωαννίνων έχει μήκος 35 χιλιόμετρα και μέσο πλάτος 3-10 χιλιόμετρα και διαχωρίζεται από τη λίμνη Παμβώτιδα σε δύο μόλις τμήματα. Το νότιο τμήμα του λεκανοπεδίου, περιβάλλεται από τα κατερχόμενα αντερείσματα των ορέων Τόμαρου, Δρίσκου και Τζουμέρκων. Από την άλλη, το βόρειο τμήμα του λεκανοπεδίου περικλείεται μεταξύ των ορέων Μιτσικελίου και Σουτίστης. Στα ανατολικά του Νομού και στα σύνορα με το νομό Τρικάλων δεσπόζει το όρος Λάκμος. Τα όρη γύρω από το λεκανοπέδιο των Ιωαννίνων, η λίμνη Παμβώτιδα καθώς και η θάλασσα του Ιονίου πελάγους διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στο κλίμα της περιοχής (Μαλδογιάννη 1971).

Οι τιμές διάφορων μετεωρολογικών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία του αέρα, η ηλιακή ακτινοβολία, η σχετική υγρασία, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου κλπ,

επηρεάζονται άμεσα από την κλιματολογία των συνοπτικών συστημάτων μέσης κλίμακας αλλά και από τους τοπικούς παράγοντες που διαμορφώνουν την καιρική κατάσταση στην εκάστοτε περιοχή μελέτης. Σύμφωνα με τον Καραλή (1969), έχει διαπιστωθεί ότι με βάση μελέτες καιρικών χαρτών, που έχουν πραγματοποιηθεί, η κατανομή των διαφόρων μετεωρολογικών στοιχείων στην Ελλάδα είναι παρόμοια για συγκεκριμένες συνοπτικές καταστάσεις. Τα κοινά χαρακτηριστικά αυτών των συνοπτικών καταστάσεων οφείλονται κατά κύριο λόγο στην παραπλήσια κατανομή των ισοβαρικών συστημάτων και την αντίστοιχα ανάλογη διάταξη αερίων μαζών. Λόγω αυτής της διαπίστωσης προέκυψε ο όρος «τύπος καιρού». Οι τύποι καιρού συμβάλλουν στη δυναμική μελέτη του κλίματος μίας περιοχής.

Είναι προφανές ότι υπάρχει στενή συσχέτιση ανάμεσα στην ατμοσφαιρική κυκλοφορία και τις μετεωρολογικές παραμέτρους του επιφανειακού κλίματος, ενώ με βάση τον Dzerdzevski (1963) «όλες οι αλλαγές που παρατηρούνται στη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση συνδέονται με αλλαγές στη συχνότητα εμφάνισης και στη διάρκεια της κυκλοφορίας μεγάλης κλίμακας».

Η αρχική ιδέα της συνδυαστικής μελέτης πολλών ταυτοχρόνως μετεωρολογικών παραμέτρων δόθηκε από τη Σοβιετική Ένωση τη δεκαετία του 1920. Συγκεκριμένα, ο Federov (1925) χρησιμοποίησε τον όρο καιρική περίπτωση (weather case) για να προσδιορίσει τον καιρό που επικρατούσε σε μία περιοχή στη διάρκεια ενός εικοσιτετράωρου (κάνοντας χρήση μέσω των τιμών των μετεωρολογικών παραμέτρων). Στη συνέχεια, ομαδοποίησε τις περιπτώσεις αυτές, σε τύπους καιρού (weather types), με βάση τα κοινά τους χαρακτηριστικά. Χρησιμοποίησε όρους όπως «ψυχρός καιρός με χιονόπτωση», «θερμός και υγρός καιρός» και εφάρμοσε τη μέθοδο που ονόμασε «σύνθετη κλιματολογία» (complex climatology).

Σήμερα στην Ελλάδα, και πιο συγκεκριμένα για την περιοχή της Αθήνας, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες ταξινόμησης των διαφόρων τύπων καιρού που επικρατούν, τόσο με την εφαρμογή ημιαντικειμενικής μεθοδολογίας (Kassomenos et al. 1998), όσο και με την εφαρμογή πλήρως αντικειμενικής μεθοδολογίας (Kassomenos et al. 2003, Sindosi et al. 2003, Lolis et al 2004).

Στην διεθνή βιβλιογραφία επικρατεί μια σύγχυση σχετικά με τον ορισμό των παραπάνω εννοιών και αρκετά συχνά οι συνοπτικοί κλιματολόγοι δεν είναι συνεπείς στους όρους που χρησιμοποιούν (Yarnal 1993). Επίσης, οι Huth et al. (2008) επισήμαναν ότι οι έννοιες «κατάταξη», «τύποι κυκλοφορίας» και «τύποι καιρού» δε γίνονται αντιληπτές με όμοιο τρόπο από όλους τους μετεωρολόγους ή κλιματολόγους, ενώ πολλές είναι και οι περιπτώσεις μελετών που χαρακτηρίζονται ως κατατάξεις, ενώ στην πραγματικότητα δεν είναι.

Με βάση, λοιπόν, μελέτες, οι τύποι καιρού αναφέρονται στις ατμοσφαιρικές συνθήκες οι οποίες επηρεάζουν την ανθρώπινη ζωή και προκύπτουν από ένα συνδυασμό διαφορετικών μετεωρολογικών στοιχείων (όπως θερμοκρασία, βροχή, ηλιοφάνεια, άνεμος) που σημειώνονται σε μια συγκεκριμένη περιοχή χωρίς να υπολογίζεται η συνοπτική κατάσταση αυτής (Maheras 1984).

Οι τύποι κυκλοφορίας (Baur et al. 1944) αναφέρονται στις συνοπτικές συνθήκες, οι οποίες επικρατούν πάνω από μια ευρύτερη περιοχή και μπορεί να διαχωρίζονται σε

κυκλωνικούς και αντικυκλωνικούς. Οι τύποι κυκλοφορίας ολοκληρώνουν τα δυναμικά στοιχεία, όπως για παράδειγμα, των τροχιών των υφέσεων, των αντικυκλώνων, των μετώπων, της ροής των ανέμων καθώς και τις μεταβολές αυτών των παραμέτρων μέσα στο χρόνο. Τέλος, ο συνοπτικός τύπος καιρού είναι το αποτέλεσμα που προκύπτει από το συνδυασμό των παραπάνω. Στην πραγματικότητα, θα μπορούσε να είναι ο τρόπος με τον οποίο τα στοιχεία του καιρού συνδυάζονται πάνω από μια περιοχή, μέσα σε ένα τύπο κυκλοφορίας, για μια μέση διάρκεια που κυμαίνεται από μια έως μερικές ημέρες (Μαχαίρας 1982).

1.2 Ρύποι-Ρύπανση

Ατμοσφαιρική ρύπανση ορίζεται η παρουσία στην ατμόσφαιρα ρύπων, ουσιών δηλαδή, σε ποσότητα και διάρκεια τέτοια ώστε να μπορούν να προκαλέσουν αρνητικές επιπτώσεις σε ζωντανούς οργανισμούς, οικοσυστήματα, στην υγεία των ανθρώπων και γενικότερα υλικές ζημιές, με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζουν το περιβάλλον ακατάλληλο για επιθυμητές χρήσεις (Κουτούπα-Ρεγκάκου 1995).

Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι που επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν το διοξείδιο του θείου, το διοξείδιο του αζώτου, τα αιωρούμενα σωματίδια διαφόρων μεγεθών, το θείο και ο μόλυβδος. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν το βενζόλιο, το μονοξείδιο του άνθρακα, το κάδμιο, το νικέλιο, ο υδράργυρος, το αρσενικό και οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (Τριανταφύλλου 2004).

Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι χωρίζονται, επιπλέον, ανάλογα με τον τρόπο που παράγονται, σε πρωτογενείς και δευτερογενείς. Πρωτογενείς είναι οι ρύποι που σχηματίζονται στις πηγές ρύπανσης. Τέτοιοι είναι κυρίως το διοξείδιο του θείου, το υδρόθειο, οι υδρογονάνθρακες, τα οξείδια του αζώτου, το μονοξείδιο του άνθρακα, ο μόλυβδος, ο αμίαντος, τα αιωρούμενα σωματίδια και ο καπνός. Δευτερογενείς ονομάζονται οι ρύποι που σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα από τους πρωτογενείς, με χημικές αντιδράσεις. Παράγονται δηλαδή από αντιδράσεις μεταξύ οξειδίων του αζώτου, οξυγόνου και υδρογονανθράκων με την επίδραση του ηλιακού φωτός. Τέτοιοι ρύποι είναι το όζον, οξείδια του αζώτου, διάφορες αλδεΐδες και κετόνες, πολύπλοκα προϊόντα γνωστά ως PAN (νιτρικά υπεροξυακετύλια) και τέλος, προϊόντα οξειδώσεως των πρωτογενών που περιέχουν θείο (τριοξείδιο του θείου, θειικό οξύ, θειικά άλατα).

Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι αποτέλεσμα συνδυασμού φυσικών πηγών και ανθρωπίνων δραστηριοτήτων, και είναι αρκετά έντονη ως φαινόμενο σε αστικές κυρίως περιοχές. Στην ατμόσφαιρα οι ρύποι μεταφέρονται λόγω κίνησης των αερίων μαζών. Φυσικές πηγές ρύπων μπορούν να είναι το έδαφος, τα ηφαίστεια, οι πυρκαγιές, οι έρμοι, οι ωκεανοί, ενώ ανθρωπογενείς πηγές είναι η θέρμανση, η βιομηχανία, η παραγωγή ενέργειας, οι διάφορες μεταφορές κ.α.

Κάθε αέριος ρύπος χαρακτηρίζεται από το χρόνο παραμονής του στην ατμόσφαιρα ή την ημιπερίοδο ζωής του, που εξαρτάται από το ρυθμό παραγωγής ή και καταστροφής του και από την συνολική του μάζα, κατά μέσο όρο, στην ατμόσφαιρα. Στον Πίνακα 1.2.1 φαίνονται οι χρόνοι παραμονής ορισμένων ρύπων στην ατμόσφαιρα.

Πίνακας 1.2.1: Χρόνος παραμονής των ρύπων στην ατμόσφαιρα.

Ρύπος	Χρόνος παραμονής
O ₃	0.4 – 90 ημέρες
PM	5 ημέρες-3 χρόνια (ανάλογα το στρώμα της ατμόσφαιρας που βρίσκονται)
NO	4 – 5 ημέρες
NO ₂	2 – 8 ημέρες
NO ₃	4-20 ημέρες
CO	0.9 – 2.7 έτη
SO ₂	0.01 – 7 ημέρες

Τα αιωρούμενα σωματίδια και το όζον (PM και O₃) είναι από τους πιο σημαντικούς ρύπους που εμφανίζονται σε ευρωπαϊκές πόλεις. Ο όρος αιωρούμενα σωματίδια χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια ποικιλία σωματιδίων που προέρχονται από πηγές, όπως καυσαέρια των αυτοκινήτων και των λεβήτων οικιακής θέρμανσης, σκόνη, καπνός κτλ. Με βάση τα τελευταία στοιχεία της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος, μετά το 1997 έως και το 50% του αστικού πληθυσμού της Ευρώπης είναι πιθανό να έχουν εκτεθεί σε συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων πάνω από το όριο που έχει θεσπιστεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση για την προστασία της ανθρώπινης υγείας. Το 61% του αστικού πληθυσμού, μάλιστα, ενδέχεται να έχουν εκτεθεί σε επίπεδα O₃ που υπερβαίνει τον στόχο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Παράλληλα, έχει υπολογιστεί ότι τα αιωρούμενα σωματίδια αεροδυναμικής διαμέτρου κάτω των 2.5μm (PM2.5) στον αέρα έχουν μειώσει στατιστικά το προσδόκιμο ζωής στην ΕΕ, περισσότερο από οκτώ μήνες.

Η Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος τόνισε ότι, ενώ οι εκπομπές αυτών των ατμοσφαιρικών ρύπων έχουν ουσιαστικά μειωθεί από το 1997, οι συγκεντρώσεις τους στον αέρα που αναπνέουμε έχουν παραμείνει σε μεγάλο βαθμό ίδιες. Μέχρι σήμερα, δε γνωρίζουμε τον ακριβή λόγο που δεν παρατηρείται μείωση των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων, αλλά πιθανό να είναι ένας συνδυασμός πολλών παραγόντων, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλείται από την αλλαγή του κλίματος, η οποία επηρεάζει την ποιότητα του αέρα, ή πιθανόν οι ρύποι να προέρχονται από άλλες ηπείρους (<http://www.eea.europa.eu/articles/air-quality-in-europe>).

Το είδος και η ποσότητα των ρύπων προσδιορίζει τα επίπεδα της ρύπανσης στην εκάστοτε περιοχή, και έτσι είναι καθοριστικά για την ποιότητα της ατμόσφαιρας. Τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μετρούνται από διάφορους σταθμούς, καθημερινά. Στην περίπτωση που κάποια τιμή ενός ή και περισσότερων ρύπων ξεπεράσει τα όρια που έχουν θεσπιστεί από διεθνείς οργανισμούς, τότε η πολιτεία έχει θεσμοθετήσει ειδικά μέτρα παρέμβασης και ελέγχου των εκπομπών των αερίων ρύπων (Αλμπάνης 2009).

Ακολούθως αναλύεται κάθε ρύπος ξεχωριστά, αναφέροντας τις πηγές παραγωγής του στην ατμόσφαιρα αλλά και τις πιθανές επιπτώσεις του στην ανθρώπινη ζωή.

Όζον (O₃)

Το όζον (O₃) είναι τριατομικό μόριο οξυγόνου και κατατάσσεται στην κατηγορία των δευτερογενών ρύπων. Είναι ένα αέριο σχετικά άχρωμο, άοσμο και ασταθές, σχετικά διαλυτό στο νερό, διασπάται εύκολα και δεν αφήνει υπολείμματα. Στη στρατόσφαιρα, το O₃, θεωρείται ιδιαίτερα ευεργετικό για τον άνθρωπο και το περιβάλλον, καθώς απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας. Από την άλλη, στην τροπόσφαιρα σε φυσιολογικές συνθήκες, το O₃ δεν προϋπάρχει. Μπορεί να δημιουργηθεί, όμως σαν αποτέλεσμα των πολύπλοκων χημικών μετασχηματισμών πρωτογενών ρυπαντών όπως για παράδειγμα, τα οξειδία του αζώτου, τα καυσαέρια των αυτοκινήτων και της βιομηχανίας, αλλά και οι πτητικές οργανικές ενώσεις, τα οποία σε συνδυασμό με την ηλιακή ακτινοβολία αντιδρούν με το οξυγόνο και με αυτόν τον τρόπο παράγουν όζον (O₃).

Το O₃, ως γνωστός φωτοχημικός ρύπος, σχηματίζεται εξαιτίας της επίδρασης της ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος από τον ήλιο σε αέριους ρύπους. Παράλληλα, έχει και ανθρωπογενή, πολλές φορές, προέλευση, λόγω της έντονης πια ανθρώπινης δραστηριότητας. Έτσι, όταν επικρατούν συνθήκες καλοκαιρίας και ιδιαίτερα αυξημένης ηλιοφάνειας, με ταυτόχρονη ύπαρξη ήπιας νέφωσης, παρατηρούμε αύξηση της συγκέντρωσης του όζοντος. Η αύξηση του τροποσφαιρικού όζοντος συμβάλει στη θέρμανση των κατώτερων επιπέδων της ατμόσφαιρας. Αντίθετα, η απουσία ηλιοφάνειας, η πυκνή νέφωση και η νέφωση σε συνδυασμό με βροχόπτωση είναι καιρικά στοιχεία που οδηγούν στη μείωση των επιπέδων της συγκέντρωσης του όζοντος σε έναν τόπο και κατ' επέκταση στη μείωση της θερμοκρασίας. Ταυτόχρονα, η ατμόσφαιρα υπό τέτοιες συνθήκες παρουσιάζεται, όπως είναι και αναμενόμενο, λιγότερο εκτεθειμένη σε ατμοσφαιρικούς ρύπους και γενικά σε ρυπογόνα σωματίδια.

Η εμφάνιση του όζοντος στα χαμηλά κυρίως στρώματα της ατμόσφαιρας έχει αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία προκαλώντας έντονα αναπνευστικά προβλήματα. Το O₃ επιδρά επίσης δυσμενώς και στο περιβάλλον, τη βλάστηση αλλά και στα διάφορα οικοσυστήματα.

Αιωρούμενα σωματίδια (PM)

Αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matters ή PM) ονομάζονται όλα τα σωματίδια στερεά και υγρά, εκτός του νερού, που είναι διεσπαρμένα στην ατμόσφαιρα και έχουν αεροδυναμική διάμετρο που είναι περίπου μεγαλύτερη από 0.0002 μm, αλλά μικρότερη από 500 μm. Αιωρούμενα σωματίδια, για παράδειγμα, χαρακτηρίζονται η σκόνη, η ιπτάμενη τέφρα και ο καπνός. Είναι, κυρίως, προϊόντα ατελούς καύσης και κατά την πλειοψηφία τους φεύγουν προς τον αέρα απευθείας από τις πηγές τους, όπως πχ οι καπνοδόχοι ή οι εξατμίσεις των οχημάτων. Υπάρχουν, ωστόσο και περιπτώσεις όπου αέρια όπως CO, SO₂, NO_x και VOCs, αντιδρούν με κάποιες άλλες ενώσεις του ατμοσφαιρικού αέρα και παράγουν έτσι τα μικρά αυτά σωματίδια.

Μια παράμετρος κατάταξης των αιωρούμενων σωματιδίων είναι η διάμετρος τους. Υπάρχουν, σωματίδια διαμέτρου μέχρι 10 μm (PM10), διαμέτρου έως 4 μm (PM4), διαμέτρου έως 2.5 μm (PM2.5) και διαμέτρου έως 1 μm (PM1), τα οποία έχουν και τη μεγαλύτερη διεισδυτικότητα στο αναπνευστικό σύστημα. Η διάμετρος των σωματιδίων

σχετίζεται άμεσα με το χρόνο παραμονής τους στον αέρα. Η βροχή και άλλες κατάλληλες μετεωρολογικές συνθήκες έχουν την ικανότητα να καθαρίζουν την ατμόσφαιρα από τα PM10 μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα (λίγων ωρών), ωστόσο, τα PM2.5 μπορούν να παραμένουν για ημέρες ή ακόμη και εβδομάδες και έτσι να διευκολύνεται η μεταφορά τους από τον άνεμο από μία περιοχή σε μια άλλη (Αλμπάνης 2009).

Τα αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη του 1 μm προέρχονται κυρίως από τη συσσωμάτωση μικρότερων σωματιδίων είτε από προϊόντα καύσης, στάχτη, σκόνη και κονιορτοποιήσεις από πεζούς και οχήματα. Στην κατηγορία αυτή, ανήκουν, για παράδειγμα η γύρη και τα έντομα.

Συγκεκριμένα για τα αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο έως 10μm, αυτά εισέρχονται στην ατμόσφαιρα σε στέρεη μορφή από την επιφάνεια της Γης ή της θάλασσας. Είναι και αυτά, με την σειρά τους, συσσωματώματα, τα οποία έχουν προκύψει από πήξη ή συμπύκνωση, όπως είναι η άμμος, τα αλουμίνια, το θαλασσινό αλάτι κλπ. Η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων κυμαίνεται σε καθαρή ατμόσφαιρα σε τιμές τάξης του 10 μg/m³.

Ένας πιο ειδικός διαχωρισμός, αναφέρει ότι αιωρούμενα σωματίδια διαμέτρου μεγαλύτερη από 2.5 μm, χαρακτηρίζονται ως "χονδρόκοκκα" σωματίδια ("coarse" particles). Σχηματίζονται κυρίως υπό την επίδραση μηχανικών δυνάμεων, όπως η τριβή. Είναι, κατά βάση σωματίδια σκόνης ή χρώματος και προέρχονται από την κίνηση του ανέμου. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν η γύρη και τα σπόρια. Αντίστοιχα, σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 2.5 μm αναφέρονται ως "λεπτόκοκκα" σωματίδια ("fine" particles). Συνήθως δημιουργούνται από τα καυσαέρια των αυτοκινήτων, από οικιακές εστίες κ.α. (<http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/10/112&format=HTM&aged=0&language=EL&guiLanguage=en>).

Η κατηγορία των λεπτόκοκκων σωματιδίων κατηγοριοποιείται σε δυο ομάδες, την περιοχή συσσώρευσης (accumulation range) για σωματίδια με διάμετρο από περίπου 0.08 μm έως 2 μm και τα ιόντα και πυρήνες Aitken (Aitken nuclei) με διάμετρο που κυμαίνεται από 0.01 έως 0.08 μm. Τα σωματίδια συσσώρευσης είναι αποτέλεσμα συμπυκνώσεων επιπρόσθετου υλικού στις ήδη συσσωματώσεις, αλλά και χημικών αντιδράσεων που γίνονται μέσα στα σύννεφα (Αλμπάνης 2003).

Τα αιωρούμενα αυτά σωματίδια και η ύπαρξη τους στην ατμόσφαιρα, έχει πολύ σημαντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία αλλά και σε πολλούς άλλους τομείς του περιβάλλοντος (Κουβαράκης 2002).

Σε ό,τι αφορά την ανθρώπινη υγεία, η επίδρασή τους εξαρτάται, κυρίως από το μέγεθος τους, καθώς αυτό καθορίζει τη δυνατότητα εισχώρησης τους στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω της διαδικασίας της αναπνοής. Τα αιωρούμενα αυτά σωματίδια, αν και μικροσκοπικά, προκαλούν ασθένειες στο αναπνευστικό σύστημα και μπορούν να οδηγήσουν ακόμη και στον θάνατο. Ιδιαίτερη προσοχή χρήζουν οι ομάδες υψηλού κινδύνου, δηλαδή οι ηλικιωμένοι, τα παιδιά και γενικότερα άτομα που πάσχουν από άσθμα.

Όσον αφορά το περιβάλλον, τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να προκαλέσουν μείωση της ορατότητας καθώς και της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γη λόγω της παρουσίας τους στην ατμόσφαιρα. Τα αιωρούμενα, αυτά, σωματίδια ανάλογα και πάλι, με το μέγεθός τους αλλά και την συγκέντρωσή τους στην ατμόσφαιρα, διαθλούν, περιθλούν, διαχέουν ή ακόμα και αποκόπτουν το φως.

Οξειδία του αζώτου (NO_x)

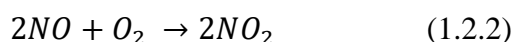
Με τον όρο οξειδία του αζώτου, στην ατμοσφαιρική, κυρίως, ρύπανση, αναφερόμαστε κατά κύριο λόγο σε δυο από τις πολυάριθμες ενώσεις που μπορούν να σχηματίσουν το άζωτο και το οξυγόνο. Αυτές είναι το μονοξείδιο του αζώτου (NO) και το διοξείδιο του αζώτου (NO₂).

Το άζωτο, όπως είναι γνωστό, αποτελεί περίπου το 78% του ατμοσφαιρικού αέρα. Κατά την καύση του σχηματίζει οξειδία. Όσο πιο μεγάλη είναι η θερμοκρασία της καύσης, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ποσότητα των οξειδίων του αζώτου που σχηματίζονται. Η εξίσωση της καύσης είναι η εξής:



Το μονοξείδιο του αζώτου (NO) είναι ένα αέριο άχρωμο και άοσμο και με μικρή τοξικότητα. Οι βασικότερες πηγές του στην ατμόσφαιρα, είναι οι μηχανές εσωτερικής καύσης, οι καυστήρες κεντρικής θέρμανσης, οι βιομηχανικοί καυστήρες, οι καυστήρες που χρησιμοποιούνται ουσιαστικά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και γενικά κλίβανοι όπου καίγονται ορυκτά καύσιμα.

Το NO στη συνέχεια με ποικίλες χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στην ατμόσφαιρα και ενισχύονται περισσότερο με την παρουσία της ηλιακής ακτινοβολίας, μετατρέπεται σε διοξείδιο του αζώτου (NO₂)



Από την άλλη πλευρά, το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) έχει αρκετά έντονη οσμή και ένα κόκκινο, κίτρινο και καστανό χρώμα. Η παρουσία του στην ατμόσφαιρα συμβάλλει στην επιπλέον μείωση της φωτεινότητας και συντελεί στη δημιουργία της φωτοχημικής αιθαλομίχλης.

Όσον αφορά τον άνθρωπο, έκθεση για μικρή σχετικά χρονική διάρκεια μπορεί να οδηγήσει σε πιθανές αναπνευστικές δυσλειτουργίες. Επιπλέον, η παρατεταμένη έκθεση σε σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλεί ευαισθησία του αναπνευστικού συστήματος και μόνιμες αλλοιώσεις στους πνεύμονες.

Ως προς το περιβάλλον, τα οξειδία του αζώτου δημιουργούν σημαντικές αλλαγές στη σύσταση ορισμένων τύπων βλάστησης, υδροβιότοπων και χερσαίων εκτάσεων. Προκαλούν, επιπλέον, όξινη βροχή και μειώνουν σημαντικά την ορατότητα. Τέλος, αυξάνουν τα επίπεδα τοξινών σε πολλά είδη ψαριών και άλλων υδρόβιων ζώων.

Διοξείδιο του θείου (SO₂)

Το διοξείδιο του θείου είναι ένα αέριο άχρωμο, άοσμο όταν βρίσκεται σε μικρές συγκεντρώσεις, αλλά με έντονη ερεθιστική οσμή σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις. Προέρχεται, βασικά, από την καύση υγρών είτε και στερεών καυσίμων, που περιέχουν θείο ως πρόσμιξη. Παράλληλα, μπορεί να δημιουργηθεί και από τις δραστηριότητες φυσικών πηγών, όπως είναι τα ηφαίστεια ή η σήψη διαφόρων οργανικών ουσιών. Διαλύεται λόγω της υγρασίας που περιέχεται στον ατμοσφαιρικό αέρα και με αυτόν τον τρόπο σχηματίζει το θειώδες οξύ (H₂SO₃). Στον ξηρό αέρα, οξειδώνεται και δημιουργεί το τριοξείδιο του θείου (SO₃), που με τη σειρά του μεταβάλλεται τελικά σε θειικό οξύ (H₂SO₄), το οποίο είναι το κύριο συστατικό της όξινης βροχής.

Το διοξείδιο του θείου είναι ένας από τους βασικότερους ρύπους των αστικών περιοχών. Προέρχεται από τη χρήση του πετρελαίου σε τέσσερις μεγάλους τομείς: τη βιομηχανία, την ηλεκτροπαραγωγή, τις μεταφορές και τον τριτογενή τομέα όπου έχει αντικαταστήσει όλες τις υπόλοιπες παραδοσιακές πηγές θερμότητας. Υπάρχουν, ωστόσο, και φυσικές πηγές παραγωγής διοξειδίου του θείου, όπως είναι οι πυρκαγιές και η σκόνη από το απογυμνωμένο έδαφος.

Ως προς τον άνθρωπο, η επιρροή του διοξειδίου του θείου προκαλεί αρχικά διάφορες αναπνευστικές δυσκολίες και, πολλές φορές, σοβαρούς ερεθισμούς στην καρδιά. Στις περιπτώσεις υψηλής έκθεσης σε μεγάλες συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου μπορούν να προκληθούν διάβρωση μέχρι και παράλυση των αναπνευστικών οργάνων. Τα άτομα με καρδιαγγειακές παθήσεις ή άλλες χρόνιες παθήσεις πνευμόνων, αλλά και παιδιά και ηλικιωμένοι, συνιστούν ομάδες υψηλού κινδύνου στην ύπαρξη διοξειδίου του θείου στην ατμόσφαιρα.

Ιδιαίτερο κίνδυνο αποτελεί το διοξείδιο του θείου, όταν βρεθεί σε συνδυασμό με άλλες ρυπαντικές ουσίες, όπως είναι τα αιωρούμενα σωματίδια και ο καπνός. Πολλές είναι οι φορές που έχουν προκληθεί σοβαρά επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Τέλος, το SO₂ συνήθως προπορεύεται των αιωρούμενων σωματιδίων με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη των 2.5 μm (PM_{2.5}), παράγοντα με ιδιαίτερα αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία.

Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)

Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) είναι, με τη σειρά του, ένα αέριο άχρωμο, άοσμο, άγευστο, ελάχιστα διαλυτό στο νερό και πιο ελαφρύ από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Αποτελεί προϊόν ατελούς καύσης οργανικών ενώσεων σε συνθήκες έλλειψης οξυγόνου. Η βασικότερη πηγή του στην ατμόσφαιρα είναι η χρήση και λειτουργία των αυτοκινήτων, ενώ πηγές παραγωγής και εκπομπής CO αποτελούν και τα διυλιστήρια πετρελαίου, η χαλυβουργία, τα ηφαίστεια, οι δασικές πυρκαγιές και διάφορες άλλες διαδικασίες βακτηριακής φύσης.

Στον ανθρώπινο οργανισμό έχει σημαντική επίδραση, καθώς δεσμεύει επιλεκτικά την αιμοσφαιρίνη του αίματος, κάτι που οδηγεί στη δύσκολη μεταφορά του οξυγόνου από τους πνεύμονες στους ιστούς και προκαλεί ναυτίες, πονοκεφάλους, ζαλάδες κλπ. Η αυξημένη έκθεση σε χαμηλές συγκεντρώσεις CO, μπορεί να επηρεάσει αρνητικά

κυρίως άτομα με καρδιακά προβλήματα και να μειώσει τις σωματικές επιδόσεις νέων και υγιών ατόμων. Έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις CO έχει σαν αποτέλεσμα την ξαφνική απώλεια της συνειδήσεως, η οποία όσο συνεχίζεται μπορεί να οδηγήσει και στο θάνατο, χωρίς παράλληλα να εμφανίζονται ιδιαίτερα έντονες αναπνευστικές διαταραχές, με αποτέλεσμα να μη γίνεται αντιληπτό από τον άνθρωπο (Franceschini et al. 2005, Μουστρής 2009). Στον Πίνακα 1.2.2 φαίνονται συνεπυγμένοι οι ρύποι με τις αντίστοιχες πηγές τους και τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.

Πίνακας 1.2.2: Πηγές και επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων του κάθε ρύπου.

Ρύπος	Πηγές	Επιπτώσεις στην υγεία
Όζον	Φωτοχημικός ρύπος. Σχηματίζεται μετά από χημική αντίδραση άλλων ρύπων, παρουσία ηλιακού φωτός.	Η έκθεση στο όζον μπορεί να προκαλέσει μια ερεθιστική επίδραση στους πνεύμονες, φλεγμονή της αναπνευστικής οδού και βραχυπρόθεσμα αναπνευστικά προβλήματα.
Πρωτογενή αιωρούμενα σωματίδια	Κίνηση οχημάτων (μηχανές ντίζελ, φρένα και ελαστικά αυτοκινήτων). Βιομηχανικές πηγές (μονάδες παραγωγής ενέργειας)	Αναπνευστικά και καρδιαγγειακά προβλήματα. Έχουν μακροχρόνιες επιπτώσεις στον οργανισμό.
Δευτερογενή αιωρούμενα σωματίδια	Σχηματίζονται με την οξείδωση παρουσία όζοντος μερικών αέριων ρύπων (SO ₂ , NO ₂). Δημιουργούν στην ατμόσφαιρα λεπτόκοκκα σωματίδια.	Αναπνευστικά και καρδιαγγειακά προβλήματα. Έχουν μακροχρόνιες επιπτώσεις στον οργανισμό.
Οξειδία του αζώτου	Κάθε είδους καύση (αυτοκίνητα, θέρμανση κλπ). Παράγονται οξειδία του αζώτου (NO _x) που στη συνέχεια παρουσία όζοντος σχηματίζουν διοξείδιο του αζώτου.	Γενική ενόχληση στο αναπνευστικό σύστημα συμπεριλαμβανομένης της αυξανόμενης πιθανότητας της αναπνευστικής μόλυνσης και της εξασθενημένης λειτουργίας των πνευμόνων.
Διοξείδιο του θείου	Καύση των στερεών καυσίμων και του πετρελαίου.	Προκαλεί δυσκολίες στην αναπνοή, ενόχληση στα μάτια, στη μύτη, στο λαιμό και στους πνεύμονες. Οι άνθρωποι που πάσχουν από άσθμα είναι πολύ πιο ευάλωτοι
Μονοξείδιο του άνθρακα	Μεταφορές και βιομηχανία. Γενικά η καύση βασισμένων στον άνθρακα καυσίμων.	Μειώνει την ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου στο αίμα. Σε χαμηλά επίπεδα μειώνει τη συγκέντρωση και σε πιο υψηλά επίπεδα προκαλεί πονοκέφαλους, ναυτία, ίλιγγο. Σε πολύ υψηλά επίπεδα μπορεί να οδηγήσει στο θάνατο.

Ευρωπαϊκό πλαίσιο και νομοθεσία για τους ατμοσφαιρικούς ρύπους

Με βάση τη νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, έχουν θεσπιστεί ορισμένες δεσμευτικές οριακές τιμές για τη μέγιστη συγκέντρωση συγκεκριμένων ρύπων που επιτρέπονται στην ατμόσφαιρα. Με αυτόν τον τρόπο, διατηρείται η ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα σε ανεκτά, για τον άνθρωπο, επίπεδα. Σε περίπτωση υπέρβασης των θεσπισμένων, αυτών τιμών, λαμβάνονται μέτρα για τον περιορισμό της ρύπανσης και τη βελτίωση ποιότητας του αέρα. Τα όρια ποιότητας της ατμόσφαιρας που έχουν θεσπιστεί, καθορίζονται με συγκεκριμένες μεθόδους. Είναι δεσμευτικά και υπολογίζονται με βάση ωριαίες μετρήσεις που γίνονται στη διάρκεια του ημερολογιακού έτους

(<http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/10/112&format=HTML&aged=0&language=EL&guiLanguage=en>).

Ο τελικός καθορισμός των ορίων έχει προσδιοριστεί σε συνδυασμό με τους επιθυμητούς στόχους που έχει θεσπίσει ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (World Health Organization, W.H.O.). Σύμφωνα με τον W.H.O και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή οι οριακές τιμές και οι στόχοι ποιότητας αέρα για συγκεκριμένους ρύπους φαίνονται, αντίστοιχα, στους Πίνακες 1.2.3 και 1.2.4 (World Health Organization 2005).

Πίνακας 1.2.3: Οριακές τιμές ρύπων σύμφωνα με τις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Επιτροπής

Ρύπος	Περίοδος αναφοράς για τον μέσο όρο	Οριακή τιμή
O ₃	Μέγιστη ημερήσια 8ωρη μέση τιμή	120 μg/m ³ (να μην γίνει υπέρβαση της τιμής περισσότερο από 25 φορές σε ένα χρόνο)
PM _{2.5}	Μέση ημερήσια τιμή	25 μg/m ³
PM ₁₀	Μέση ημερήσια τιμή	50 μg/m ³ (να μην γίνει υπέρβαση της τιμής πάνω από 35 ημέρες τον χρόνο)
NO ₂	1 ώρα	200 μg/m ³ (να μην γίνει υπέρβαση της τιμής περισσότερο από 18 φορές σε ένα χρόνο)
SO ₂	1 ώρα	350 μg/m ³ (να μην γίνει υπέρβαση της τιμής περισσότερο από 24 φορές σε ένα χρόνο)
CO	Μέγιστη ημερήσια 8ωρη μέση τιμή	10 μg/m ³

Πίνακας 1.2.4: Στόχοι ποιότητας αέρα του W.H.O

Ρύπος	Οριακή τιμή	Χρόνος μεσοποίησης
O ₃	100 µg/m ³	8 h
NO ₂	200 µg/m ³ 40 - 50 µg/m ³	1 h ετήσια
SO ₂	500 µg/m ³ 350 µg/m ³ 125 µg/m ³ 50 µg/m ³	10 min 1 h 24 h ετήσια
CO	100 mg/m ³ 60 mg/m ³ 30 mg/m ³ 10 mg/m ³	15 min 30 min 1 h 8 h

1.3 Μετεωρολογικές παράμετροι και ατμοσφαιρικοί ρύποι

Σύμφωνα με διάφορες μελέτες, υπάρχει μια σαφώς καθορισμένη σχέση μεταξύ της μετεωρολογίας και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Οι βασικότερες μετεωρολογικές διεργασίες που επηρεάζουν τοπικά τις συγκεντρώσεις των διαφόρων ρύπων στην ατμόσφαιρα είναι η οριζόντια μεταφορά από τον άνεμο, η ξηρή και υγρή απόθεση, η οριζόντια αραίωση του οριακού στρώματος και οι φωτοχημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν ουσιαστικά τη συγκέντρωση των ατμοσφαιρικών ρύπων παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω:

- ο Οριακό στρώμα

Η θερμική δομή του οριακού στρώματος και κατ' επέκταση ο σχηματισμός συνθηκών ευστάθειας, αναστροφών κλπ. μπορούν να εγκλωβίζουν τους ατμοσφαιρικούς ρύπους κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, ελαττώνοντας έτσι την κατακόρυφη διασπορά. Οι συνθήκες ευστάθειας ή, αντίστοιχα, οι τοπικοί κυκλοφοριακοί κύκλοι, όπως για παράδειγμα οι αύρες, έχουν τη δυνατότητα είτε να παγιδεύσουν τους ρύπους είτε να τους διασκορπίσουν σε μικρές αποστάσεις. Εντός του οριακού στρώματος συμβαίνει η κατακόρυφη αραίωση διαφόρων ατμοσφαιρικών ρύπων. Το ύψος, λοιπόν, στο οποίο φτάνει το οριακό στρώμα καθορίζει, ως έναν βαθμό, τα επίπεδα ρύπανσης μιας περιοχής. Όσο ψηλότερα εκτείνεται το οριακό στρώμα, τόσο μεγαλύτερη είναι και η αραίωση των ρύπων και κατ' επέκταση τόσο μικρότερες οι συγκεντρώσεις των ρύπων κοντά στο έδαφος. Αντίστοιχα, όταν το ύψος του οριακού στρώματος είναι σχετικά μικρό, η αραίωση των ρύπων θα είναι και αυτή μικρή, και οι τιμές των συγκεντρώσεων των ρύπων κοντά στην επιφάνεια του εδάφους θα είναι υψηλές.

- Ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη συγκέντρωση των ρύπων και ιδιαίτερα του όζοντος. Πρωτίστως, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο σε φωτοχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στην ατμόσφαιρα και με αυτό τον τρόπο επηρεάζει τους ρύπους που παράγονται μέσω των αντιδράσεων αυτών (Boy and Kulmala 2002).

Ταυτόχρονα, η ηλιακή ακτινοβολία συνδέεται με την ανάπτυξη του οριακού στρώματος. Κατά τη διάρκεια μίας φυσιολογικής ημέρας, η ηλιακή ακτινοβολία είναι πιο έντονη τις μεσημεριανές κυρίως ώρες. Τις ώρες αυτές το οριακό στρώμα είναι υψηλό και άρα σύμφωνα με τα παραπάνω, οι συγκεντρώσεις των ρύπων κοντά στο έδαφος, μικρές. Αντιθέτως, το βράδυ ηλιακή ακτινοβολία δεν υπάρχει με αποτέλεσμα το οριακό στρώμα να είναι μικρό έως μηδαμινό και αντίστοιχα να επικρατούν μεγάλες συγκεντρώσεις ρύπων κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

- Νέφωση

Η νέφωση που επικρατεί σε μια περιοχή καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία φτάνει στο έδαφος. Υψηλό ποσοστό νέφωσης οδηγεί στην ανάκλαση και απορρόφηση μεγάλου μέρους ηλιακής ακτινοβολίας με αποτέλεσμα η ένταση της ακτινοβολίας που φτάνει τελικά στο έδαφος να μειώνεται. Είναι, παράλληλα, υπεύθυνη για τη μείωση της φωτοχημικής δραστηριότητας και επομένως την επιβράδυνση του σχηματισμού δευτερογενών ρύπων.

- Θερμοκρασία αέρα

Η θερμοκρασία επηρεάζει ουσιαστικά τις φωτοχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στην ατμόσφαιρα. Οι υψηλές θερμοκρασίες του αέρα συνδέονται με ανέφελο ουρανό, αδρανή κυκλοφορία και καταβύθιση του ανώτερου αέρα. Τα φαινόμενα αυτά συντελούν στην παραγωγή ρύπων με φωτοχημικές διεργασίες, επιταχύνουν τον σχηματισμό αυτών και ταυτόχρονα συντελούν στη συσσώρευση των ρύπων σε μια συγκεκριμένη περιοχή.

- Σχετική υγρασία

Η σχετική υγρασία σχετίζεται άμεσα με τη θερμοκρασία. Αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται, κατά κανόνα, μείωση της σχετικής υγρασίας. Επιπλέον, η υγρασία του περιβάλλοντος καθορίζει την ελάχιστη θερμοκρασία. Συνεπώς, όσο μικρότερη σχετική υγρασία έχουμε, τόσο θα επικρατούν υψηλότερες θερμοκρασίες και αντίστοιχα επιτάχυνση σχηματισμού και παραγωγής ατμοσφαιρικών ρύπων.

- Βροχή

Η βροχή οδηγεί στην υγρή απόθεση των ρύπων. Συμβάλλει, λοιπόν, καθοριστικά στην απομάκρυνση των ρύπων από την ατμόσφαιρα, τόσο κατά τον σχηματισμό της, όσο και κατά την πτώση της. Γενικότερα, εκτιμάται ότι ένα μεγάλο ποσοστό της τάξης του 80% των ρύπων αποτίθεται, λόγω κάποιας δυνατής και παράλληλα μεγάλης διάρκειας βροχής.

- Ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου

Η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου διαδραματίζουν καίριο ρόλο στη διασπορά των ατμοσφαιρικών ρύπων που εκλύονται από μια περιοχή. Η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό, το ρυθμό αραίωσης των ρύπων. Άνεμοι μικρής έντασης ή η άπνοια δεν ευνοούν τη διασπορά των ρύπων και έτσι συντελούν στην αύξηση των επιπέδων ρύπανσης (Kassomenos et al. 1995, 1998). Επιπλέον, η ανάπτυξη του συστήματος κυκλοφορίας της θαλάσσιας αύρας συνδέεται με ασθενείς ανέμους και συμβάλλει σημαντικά στην παραγωγή δευτερογενών σωματιδίων (Colbeck et al. 2002). Από την άλλη, η διεύθυνση ανέμου σχετίζεται άμεσα με την κατεύθυνση στην οποία θα μεταφερθούν οι ρύποι στην ατμόσφαιρα και έτσι συνδέεται με τον καθορισμό της ρύπανσης της εκάστοτε περιοχής.

- Ταυτόχρονη συγκέντρωση άλλων ρύπων

Είναι γνωστό ότι η χημεία της κατώτερης τροπόσφαιρας είναι αποτέλεσμα αλληλοεπιδρουμένων χημικών αντιδράσεων. Η τιμή της συγκέντρωσης κάποιου ρύπου, δηλαδή, σχετίζεται άμεσα με τη διακύμανση και το ποσό της συγκέντρωσης ενός ή περισσότερων άλλων ρύπων. Ένα χαρακτηριστικό τέτοιο παράδειγμα είναι το όζον (O_3), του οποίου η συγκέντρωση επηρεάζεται από τις συγκεντρώσεις μονοξειδίου και διοξειδίου του αζώτου (Papanastasiou and Melas 2007).

- Χρονική διακύμανση συγκέντρωσης ρύπων

Οι συγκεντρώσεις των ρύπων, συνήθως, εμφανίζουν κάποια χρονική διακύμανση, είτε βραχυχρόνια (εβδομαδιαία, ημερήσια), είτε μακροχρόνια (ετήσια). Η διακύμανση αυτή μπορεί να οφείλεται σε ποικίλα περιοδικά μετεωρολογικά ή μη φαινόμενα. Δυο χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν το όζον (O_3) και τα PM_{10} . Και οι δυο, αυτοί, ρύποι παρουσιάζουν ετήσια, εβδομαδιαία και ημερήσια διακύμανση. Το όζον (O_3), καθώς συνδέεται άρρηκτα με τη ροή της ηλιακής ακτινοβολίας και όπως είναι αναμενόμενο, έχει μεγαλύτερη συγκέντρωση κατά τους θερινούς μήνες, όταν δηλαδή, και η ηλιακή ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη. Όσον αφορά την εβδομαδιαία διακύμανση, παρατηρείται μια πτώση των τιμών των συγκεντρώσεων όλων των ρύπων, εκτός του O_3 , το σαββατοκύριακο, διότι τότε μειώνεται η κυκλοφορία των οχημάτων στους δρόμους και κατ' επέκταση οι ποσότητες των υδρογονανθράκων και του μονοξειδίου του αζώτου, με αποτέλεσμα να μη διευκολύνεται η καταστροφή του O_3 . Για την ημερήσια διακύμανσή του, οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται αργά το μεσημέρι, ενώ οι ελάχιστες το πρωί και πριν την αυγή. Τα σωματίδια PM_{10} έχουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις την ψυχρή περίοδο του έτους, καθώς τότε είναι έντονη η καύση των καυσίμων, λόγω χρήσης μέσων θέρμανσης και ταυτόχρονα λόγω αυξημένης κυκλοφορίας οχημάτων. Ως προς την εβδομαδιαία διακύμανση, ακολουθούν τη ροή των υπόλοιπων ρύπων για τον ίδιο λόγο. Τέλος, για την ημερήσια διακύμανση, τα PM_{10} παρουσιάζουν δυο μέγιστα στη διάρκεια της ημέρας. Αυτά σχετίζονται με την κυκλοφορία των οχημάτων στους δρόμους (Ziomas et al. 1995, Massart et al. 1998, Papanastasiou and Melas 2007, Papanastasiou et al. 2007).

Γενικότερα, έχει παρατηρηθεί ότι, ανεξάρτητα από τα μετεωρολογικά φαινόμενα που επικρατούν σε μια περιοχή, ακόμη δηλαδή και όταν αυτά είναι σταθερά, υπάρχει

μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης επεισοδίων ρύπανσης, όταν οι τιμές των συγκεντρώσεων των ρύπων είναι ιδιαίτερα αυξημένες την προηγούμενη ημέρα.

Έχουν γίνει πολλές έρευνες συσχέτισης των μετεωρολογικών παραμέτρων με την ατμοσφαιρική ρύπανση και την ποιότητα του αέρα, στις οποίες, χρησιμοποιήθηκαν τα συνοπτικά καιρικά συστήματα που επικρατούσαν σε μια περιοχή και όχι μεμονωμένες οι παραπάνω μετεωρολογικοί παράμετροι. Αυτό ήταν ιδιαίτερα εύστοχο, καθώς τα συνοπτικά καιρικά συστήματα περιλαμβάνουν το σύνολο της μετεωρολογικής πληροφορίας που είναι απαραίτητη. Μάλιστα, ακριβώς επειδή τα συνοπτικά συστήματα μπορούν να προβλεφθούν με ακρίβεια δυο με τρεις μέρες πριν, είναι εφικτή και η χρήση αυτών των συστημάτων, με σκοπό την πρόγνωση των επιπέδων ατμοσφαιρικής ρύπανσης και ποιότητας του αέρα για μια περιοχή.

Στο παρελθόν μελετήθηκε ιδιαίτερα, από πολλούς ερευνητές και για διάφορες περιοχές ανά τον κόσμο, η ατμοσφαιρική κυκλοφορία σε συσχέτιση με τα επίπεδα ποιότητας του αέρα για την εκάστοτε περιοχή. Οι Chung et al. (1999) έκαναν μια τέτοια μελέτη για την περιοχή του Χονγκ Κονγκ, σε έναν παράκτιο σταθμό, για ένα ολόκληρο έτος και διαπίστωσαν την συσχέτιση τεσσάρων τύπων καιρού με επεισόδια υψηλού CO. Οι Chaloulakou et al. (2000) για την πόλη της Αθήνας, προσπάθησαν να συσχετίσουν οκτώ συνοπτικούς τύπους καιρού με τα υψηλά επίπεδα συγκεντρώσεων σωματιδίων PM10 και PM2.5. Στην συνέχεια, οι Sanchez and Andrare (2002) μελέτησαν κατά τους καλοκαιρινούς μήνες στο Σάο Πάολο της Βραζιλίας και κατέληξαν στη συσχέτιση των έξι συνοπτικών τύπων με την αυξημένη συγκέντρωση ιχνοστοιχείων. Αυτές οι τρεις μελέτες έγιναν με συστήματα ταξινόμησης της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, που εμπεριείχαν μεγάλο βαθμό υποκειμενικότητας.

Τα τελευταία, ωστόσο, χρόνια έχουν γίνει εξίσου πολλές παρόμοιες έρευνες με συστήματα συνοπτικής ταξινόμησης, τα οποία βασίζονται σε υπολογιστές και αυτοματοποιημένα συστήματα. Πιο συγκεκριμένα, οι Kalkstein and Corrigan (1986) εφάρμοσαν για την πόλη του Γουίλμινγκτον στις ΗΠΑ, μια μέθοδο βασισμένη στην Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών και την Ανάλυση κατά Συστάδες με σκοπό τη δημιουργία ενός συστήματος συνοπτικής ταξινόμησης και της συσχέτισής των συνοπτικών τύπων με τις μεταβολές των συγκεντρώσεων του SO₂. Έπειτα, οι Comrie and Yamal (1992), στο Πίτσμπουργκ της Πενσυλβανίας, κατέληξαν μετά από έρευνα στη σχέση μεταξύ συνοπτικών συστημάτων ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας και των συγκεντρώσεων του O₃. Οι McGregor and Bamzeli (1995), μελέτησαν για το Μπέρμινγχαμ της Αγγλίας για μια διετή χρονική περίοδο τη συσχέτιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των τύπων αερίων μαζών, τους οποίους και προσπάθησαν οι ίδιοι να ορίσουν μέσω της Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών και της Ανάλυσης κατά Συστάδες. Την ίδια χρονιά, οι Dorling and Davies (1995) ασχολήθηκαν με την όξινη εναπόθεση για τη βορειοανατολική Ευρώπη, και έπειτα την συσχέτισαν με έξι συνοπτικούς τύπους καιρού για το χειμώνα και το καλοκαίρι. Εν συνέχεια, οι Shahgedanova et al. (1998) καθόρισαν, μέσω της Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών και της Ανάλυσης κατά Συστάδες, εποχικούς δείκτες για να τους χρησιμοποιήσουν στη μελέτη της μεταβλητότητας των συγκεντρώσεων των CO και NO₂. Την ίδια περίοδο, οι Greene et al. (1999) μελέτησαν για τέσσερις διαφορετικές πόλεις των ΗΠΑ, χρησιμοποιώντας έναν συνοπτικό δείκτη για τη θερινή περίοδο, τη συσχέτιση ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Τέλος, οι Kassomenos et

al. (2003), έκαναν μια αντίστοιχη μελέτη για την πόλη της Αθήνας και συσχέτισαν τους εποχιακούς τύπους ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας με τους ατμοσφαιρικούς ρύπους και τα χαρακτηριστικά της ποιότητας του αέρα.

1.4 Στόχος και δομή της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει σκοπό τη δημιουργία μιας αντικειμενικής ταξινόμησης τύπων καιρού για την περιοχή των Ιωαννίνων και τη συσχέτιση αυτών των τύπων, με τα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης στη συγκεκριμένη περιοχή, για την τριετή περίοδο 15/2/2019-14/2/2022. Η περίοδος μελέτης είναι περιορισμένη λόγω της μικρής διαθεσιμότητας ποιοτικών μετρήσεων της τοπικής ρύπανσης του αέρα (αέρια και σωματίδια).

Αξίζει να αναφερθεί η λήψη ικανοποιητικού πλήθους μετεωρολογικών παραμέτρων, που έλαβαν χώρα στην παρούσα εργασία, τόσο από τον αυτόματο περιβαλλοντικό σταθμό της Περιφέρειας Ηπείρου που βρίσκεται στο κέντρο των Ιωαννίνων, όσο και από τη βάση δεδομένων ERA5 Reanalysis. Από τον αυτόματο περιβαλλοντικό σταθμό της Περιφέρειας Ηπείρου ελήφθησαν δεδομένα συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών ρύπων και πιο συγκεκριμένα των ρύπων PM1, PM2.5, PM4, PM10, NO, NO₂, NO_x, CO, SO₂ και O₃. Με τη χρήση μιας πολυμετάβλητης στατιστικής μεθοδολογίας των μετεωρολογικών παραμέτρων καθορίστηκε ο αριθμός των τύπων καιρού (WT) σε καθημερινή βάση για την πόλη των Ιωαννίνων. Για κάθε τύπο καιρού (WT), σχεδιάστηκαν οι μέσοι χάρτες των γεωδυναμικών υψών των 500hPa και των 1000hPa αντίστοιχα, της θερμοκρασίας αέρα 850hPa πάνω από την περιοχή της Ευρώπης και οι χάρτες θερμοκρασίας αέρα στα 2m, σχετικής υγρασίας, νέφωσης και ταχύτητας ανέμου πάνω από την ευρύτερη περιοχή της Ηπείρου.

Έπειτα, για κάθε τύπο καιρού μελετήθηκαν οι μέσες τιμές, οι τυπικές αποκλίσεις, και οι μέσες ημερήσιες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων όλων των ρύπων. Ακολούθησε μια συσχέτιση του κάθε ρύπου με τους τύπους καιρού που έχουν προκύψει. Για τον κάθε ρύπο ξεχωριστά, μελετήθηκαν οι τιμές των συγκεντρώσεων και συγκρίθηκαν με τις ευρωπαϊκά θεσπισμένες οριακές τιμές. Διαπιστώθηκε, στη συνέχεια, ποιοι ρύποι ξεπερνούν τα όρια και είναι ικανοί να δημιουργήσουν επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Τέλος, ερευνήθηκε η εξέλιξη της συγκέντρωσης αυτών των ρύπων σε ακολουθίες συνεχόμενων ημερών επικράτησης ίδιου τύπου καιρού.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, περιγράφονται αναλυτικά, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία, καθώς και η προέλευσή τους. Επιπλέον, γίνεται εκτενής ανάλυση της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε, των στατιστικών ανάλυσης, των μοντέλων και το θεωρητικό υπόβαθρο αυτών, καθώς και του τρόπου επιλογής κριτηρίων και ομαδοποίησης των δεδομένων. Γενικότερα εξηγείται ο τρόπος εφαρμογής των μεθόδων που έχουν χρησιμοποιηθεί στην εργασία.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων της διπλωματικής εργασίας. Αναφέρονται αναλυτικά οι τύποι καιρού και τα χαρακτηριστικά του καθενός από αυτούς, η ενδοημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των ρύπων και η συσχέτιση τους με τους τύπους καιρού, αλλά γίνεται και εκτενής ανάλυση για τον κάθε ρύπο και

τα όρια αυτού, με βάση τις θεσμοθετημένες οριακές τιμές. Η επεξεργασία και συσχέτιση των αποτελεσμάτων αυτών έχει ως σκοπό τη μελέτη της επίδρασης και την εξάρτηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν. Η ταξινόμηση αυτή θα μπορούσε να αποτελέσει, κάλλιστα, τη βάση για την παρακολούθηση ή και έγκαιρη πρόγνωση επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης και την πρόληψη αυτών.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια σύνοψη των αποτελεσμάτων και αναφέρονται τα γενικά συμπεράσματα και τα σημαντικότερα ευρήματα της διπλωματικής εργασίας.

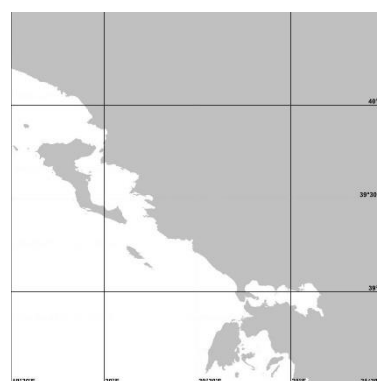
2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Δεδομένα

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία αποτελούνται από ημερήσιες τιμές δύο συνόλων μετεωρολογικών παραμέτρων, που αναφέρονται σε πλεγματικά σημεία στην περιοχή της νοτιοανατολικής Ευρώπης και την ευρύτερη περιοχή της Ηπείρου αντίστοιχα (Σχήματα 2.1.1 και 2.1.2), και ημερήσιες τιμές μετεωρολογικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων από περιβαλλοντικό σταθμό εγκατεστημένο στην περιοχή των Ιωαννίνων για τη χρονική περίοδο 15/2/2019-14/2/2022.



Σχήμα 2.1.1: Περιοχή της νοτιοανατολικής Ευρώπης (30°N-55°N, 0°-40°E)



Σχήμα 2.1.2: Ευρύτερη περιοχή της Ηπείρου (38,5°N-40,5°N, 19,5°E-21,5°E)

Το πρώτο σύνολο παραμέτρων, που αναφέρεται στην περιοχή της νοτιοανατολικής Ευρώπης (30°N-55°N, 0°-40°E), έχει χωρική ανάλυση 1°x1° και περιλαμβάνει ημερήσιες τιμές (12 UTC) του γεωδυναμικού ύψους των ισοβαρικών επιφανειών 500hPa και 1000hPa (σε γεωδυναμικά μέτρα, gpm) και της θερμοκρασίας του αέρα στην ισοβαρική επιφάνεια 850hPa (σε βαθμούς Κελσίου, °C). Το δεύτερο σύνολο παραμέτρων, που έχει χωρική ανάλυση 0.25°x0.25°, περιλαμβάνει ημερήσιες τιμές κατά τις ώρες 00, 06, 12 και 18 UTC της θερμοκρασίας του αέρα και του σημείου δρόσου στα 2 μέτρα από την επιφάνεια της γης (σε βαθμούς Κελσίου, °C), {από όπου υπολογίσαμε και τιμές της τάσης και μέγιστης τάσης των υδρατμών, μέσω των τύπων

$e = 6.112 \cdot \exp\left(\frac{17.67 \cdot T_d}{T_d + 243.5}\right)$, $e_s = 6.112 \cdot \exp\left(\frac{17.67 \cdot T}{T + 243.5}\right)$, αντίστοιχα, και έπειτα μέσω του τύπου $RH = e/e_s$ τη σχετική υγρασία (σε ποσοστό %)), τη ζωνική και τη μεσημβρινή συνιστώσα του ανέμου στα 10 μέτρα από την επιφάνεια της γης (σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο, m/s), και την ολική νεφοκάλυψη (σε ποσοστό, %). Το δεύτερο αυτό σύνολο των παραμέτρων αναφέρεται στην ευρύτερη περιοχή της Ηπείρου (38.5°N-40.5°N, 19.5°E-21.5°E). Και τα δύο σύνολα δεδομένων ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων ERA5 Reanalysis. Η ERA5 είναι μια πρόσφατη βάση δεδομένων, η οποία περιλαμβάνει ωριαίες τιμές ατμοσφαιρικών, χερσαίων και ωκεάνιων παραμέτρων, σε οριζόντια ανάλυση της τάξης χιλιομέτρων, για 137 επίπεδα από την επιφάνεια της γης μέχρι τα 80 km και παρέχεται από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (European Centre for Medium Range Weather Forecasts - ECMWF) (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>).

Επίσης, ελήφθησαν από τον αυτόματο περιβαλλοντικό σταθμό της Περιφέρειας Ηπείρου (Σχήμα 2.1.3), που βρίσκεται στο κέντρο των Ιωαννίνων, ωριαίες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα (σε βαθμούς Κελσίου, °C), της σχετικής υγρασίας (σε ποσοστό, %), της ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου (σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο, m/sec και μοίρες, °, αντίστοιχα), από όπου υπολογίσαμε τη ζωνική και τη μεσημβρινή συνιστώσα του ανέμου (σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο, m/s), μέσω των τύπων: $u = U \cdot \cos(270 - \text{degr})$ και $v = U \cdot \sin(270 - \text{degr})$, όπου U =ταχύτητα ανέμου και degr =διεύθυνση ανέμου και τέλος, τις συγκεντρώσεις βασικών ατμοσφαιρικών ρύπων, και πιο συγκεκριμένα των σωματιδίων PM1, PM2,5, PM4, PM10, και αερίων NO, NO₂, NO_x, CO, SO₂ και O₃ (σε μικρογραμμάρια ανά κυβικό μέτρο, μg/m³ εκτός από το NO_x το οποίο καταγράφεται σε μέρη στο δισεκατομμύριο, ppb). Οι τιμές αυτές μεταβιβάζονται στον κεντρικό υπολογιστή της υπηρεσίας, μέσω τηλεφωνικής γραμμής και με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η συνεχής παρακολούθηση των επιπέδων ατμοσφαιρικής ρύπανσης.



Σχήμα 2.1.3: Περιβαλλοντικός σταθμός στην Περιφέρεια Ηπείρου, Ιωάννινα

ERA5 Reanalysis

Η βάση δεδομένων ERA5 αποτελεί την πιο πρόσφατη και εκσυγχρονισμένη βάση δεδομένων αναδρομικής ανάλυσης (reanalysis) που δημιουργήθηκε από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF). Το ECMWF είναι ένας ανεξάρτητος διακυβερνητικός οργανισμός που εδρεύει στο Ηνωμένο Βασίλειο και υποστηρίζεται από την πλειοψηφία των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Η βάση δεδομένων ERA5 ξεκίνησε να λειτουργεί τον Ιανουάριο του 2016 και βασίζεται στο προγνωστικό σύστημα (IFS) Cy41r2, το οποίο λειτουργούσε επιχειρησιακά εκείνο το χρονικό διάστημα. Παρέχει δεδομένα κάθε μία ώρα (από το 1979 μέχρι σήμερα) για έναν μεγάλο αριθμό ατμοσφαιρικών, χερσαίων και ωκεάνιων μεταβλητών, 7 μόλις ημέρες μετά τον πραγματικό τους χρόνο. Τα δεδομένα αυτά είναι ελεύθερα για κάθε χρήστη και διαθέσιμα στη διεύθυνση: <https://apps.ecmwf.int/datasets/>.

Η ERA5 αποτελεί την πλέον βελτιωμένη έκδοση των προηγούμενων βάσεων δεδομένων του ECMWF, και πιο συγκεκριμένα των ERA-40 και ERA-Interim, καθώς εμπεριέχει δεδομένα υψηλότερης ποιότητας, αλλά και υψηλότερης χωρικής και χρονικής ανάλυσης. Πιο ειδικά, περιλαμβάνει δεδομένα από το 1950, με χωρική ανάλυση $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$. Πρόκειται για σαφώς πιο βελτιωμένη χωρική ανάλυση από την ERA-Interim, παρόλο που και οι δύο έχουν παγκόσμια κάλυψη. Η ERA-Interim έχει οριζόντια χωρική ανάλυση 80 km και κατά την κατακόρυφο χρησιμοποιεί 60 επίπεδα από την επιφάνεια μέχρι τη στάθμη πίεσης 0.1 hPa. Από την άλλη πλευρά, η εκσυγχρονισμένη ERA5 έχει οριζόντια χωρική ανάλυση 31 km και κατά την κατακόρυφο προσομοιώνει την ατμόσφαιρα χρησιμοποιώντας 137 επίπεδα από την επιφάνεια μέχρι ένα ύψος ίσο με 0.01hPa. Η ERA5, επιπλέον, παρέχει πεδία ωριαίας ανάλυσης και πρόγνωσης, ενώ η ERA-Interim παρέχει πεδία ανάλυσης ανά 6 ώρες και πεδία πρόγνωσης ανά 3 ώρες (Copernicus Climate Change Service 2017, Hersbach et al. 2020).

Για την αφομοίωση των δεδομένων, εφαρμόζεται τετραδιάστατη ανάλυση μεταβλητών (4D-var). Η ERA5 εφαρμόζει το νεότερο ενσωματωμένο σύστημα πρόγνωσης IFS "Cy41r2" 4D-var. Περιλαμβάνει διάφορα πρόσφατα επανεπεξεργασμένα σύνολα δεδομένων, όπως για παράδειγμα, το OSI-SAFr, την επανεπεξεργασμένη έκδοση του Ocean and Sea Ice Satellite Application Facilities (OSI-SAF) για τη συγκέντρωση θαλάσσιου πάγου. Παράλληλα, είναι διαθέσιμες ως μέρος των αρχείων εξόδου, νέες παράμετροι, όπως το διάνυσμα ανέμου στα 100 m. Σύμφωνα με παρατηρήσεις από σταθμούς πάνω από ωκεανό, η ERA5 παρεμβάλλεται διγραμμικά στις θέσεις των ωκεάνιων σταθμών (Hersbach and Dee 2016).

Γενικά, υπάρχει μεγάλη ποικιλία παραμέτρων, τις οποίες παρέχει η βάση δεδομένων ERA5, συμπεριλαμβανομένων παραμέτρων της επιφάνειας του εδάφους, της ανώτερης ατμόσφαιρας καθώς και των ωκεανών. Για την παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα γεωδυναμικών υψών 500hPa και 1000hPa, θερμοκρασίας αέρα 850hPa με χωρική ανάλυση $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ και χρονική ανάλυση ανά 24 ώρες (12 UTC), που αναφέρονται στην περιοχή της νοτιοανατολικής Ευρώπης, αλλά και δεδομένα θερμοκρασίας αέρα και σημείου δρόσου στα 2m, ζωνικές και μεσημβρινές συνιστώσες ανέμου στα 10m

και ολικής νέφωσης, με χωρική ανάλυση $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ και χρονική ανάλυση ανά 6 ώρες (00, 06, 12 και 18 UTC) και αφορούν την ευρύτερη περιοχή της Ηπείρου. Όλα αυτά τα δεδομένα αφορούν την τριετή χρονική περίοδο 15/2/2019-14/2/2022.

2.2 Μεθοδολογία

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο πολυμεταβλητές στατιστικές μέθοδοι: η Παραγοντική Ανάλυση (Factor Analysis, FA) και η Ανάλυση κατά Συστάδες (Cluster Analysis, CA). Τα βασικά στοιχεία αυτών των μεθόδων παρουσιάζονται στις ακόλουθες παραγράφους.

2.2.1 Παραγοντική Ανάλυση (Factor Analysis, FA)

Η Παραγοντική Ανάλυση είναι μια στατιστική μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη μείωση της διαστατικότητας ενός συνόλου δεδομένων. Αυτό επιτυγχάνεται με τον ορισμό ενός μικρού αριθμού νέων μεταβλητών που εκφράζουν ένα μεγάλο ποσοστό της διακύμανσης του αρχικού συνόλου δεδομένων (Jolliffe 1998). Η Παραγοντική Ανάλυση, λοιπόν, αποτελεί μία τεχνική ανακάλυψης ομάδων μεταβλητών που έχει ως στόχο την κατανόηση της δομής ενός συνόλου μεταβλητών. Οι μέθοδοι της πολυμεταβλητής ανάλυσης χρησιμοποιούνται ευρέως για στατιστική ανάλυση και εξαγωγή συμπερασμάτων σε ιδιαίτερα μεγάλα σύνολα δεδομένων με μεγάλο όγκο μεταβλητών. Η FA θεωρείται ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στο έργο των ερευνητών και βρίσκει εφαρμογή σε μεγάλα σύνολα δεδομένων, τα οποία αποτελούνται από πολλές μεταβλητές. Είναι ευρέως διαδομένη τεχνική με εφαρμογές στις κοινωνικές επιστήμες, την οικονομία, το μάρκετινγκ, τη γεωγραφία, την κλιματολογία κλπ. (Stewart 1981, Σιντόση 2000).

Κύρια λειτουργία της FA είναι η εύρεση νέων, ασυσχέτιστων μεταξύ τους μεταβλητών-παραγόντων μέσα από ένα σύνολο πολύπλοκα συσχετιζόμενων μεταβλητών (Wells and Sheth 1971). Βασικός σκοπός της μεθόδου είναι η μείωση των διαστάσεων του προβλήματος, διατηρώντας όσο το δυνατόν τις κύριες πληροφορίες των αρχικών μεταβλητών. Πιο συγκεκριμένα, η FA μπορεί να ερμηνεύσει και να εξετάσει τις σχέσεις μεταξύ ενός μεγάλου αριθμού μεταβλητών μέσα από την ανάδειξη παραγόντων που επηρεάζουν και καθορίζουν την εξέλιξη των αρχικών μεταβλητών. Παράλληλα, καθορίζει τον αριθμό των νέων παραγόντων, δίνοντας τους μια ερμηνεία. Έχει τη δυνατότητα να μειώνει τον όγκο των δεδομένων, χωρίς μεγάλη απώλεια πληροφορίας, συμβάλλοντας έτσι στην επεξεργασία των δεδομένων και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Ως προς τον μαθηματικό συλλογισμό που χρησιμοποιείται κατά την εφαρμογή της μεθόδου, παρουσιάζονται τα εξής.

Αρχικά, απώτερος σκοπός είναι η αντικατάσταση μεγάλου πλήθους p συσχετιζόμενων αρχικών μεταβλητών X_1, X_2, \dots, X_p από άλλες ασυσχέτιστες μεταξύ τους μεταβλητές F_1, F_2, \dots, F_m πλήθους m ($m < p$), οι οποίες καλούνται παράγοντες (factors). Οι τιμές των παραγόντων ονομάζονται τιμές επίδοσης (factor scores) και έχουν μέση τιμή ίση

με το μηδέν και διακύμανση ίση με την μονάδα. Οι παράγοντες F_j είναι πολύ λιγότεροι σε αριθμό από τις αρχικές μεταβλητές, όμως ερμηνεύουν σε μεγάλο ποσοστό την αρχική πληροφορία. Κάθε μία από τις αρχικές μεταβλητές p μπορούν να εκφραστούν ως γραμμικός συνδυασμός των παραγόντων, σύμφωνα με την εξίσωση (2.2.1):

$$X_i = a_{i1}F_1 + a_{i2}F_2 + \dots + a_{im}F_m \quad (2.2.1)$$

όπου F_1, F_2, \dots, F_m είναι οι νέες μεταβλητές (factors) και $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}$ τα φορτία των παραγόντων (factor loadings), τα οποία εκφράζουν την συσχέτιση της μεταβλητής X_i με καθέναν από τους παράγοντες. Το άθροισμα $\sum_{j=1}^m a_{ij}^2$ ονομάζεται εταιρικότητα (communality) της X_i και αποτελεί τμήμα της διακύμανσης της, το οποίο ερμηνεύεται από το σύνολο των m παραγόντων (Manly 1986, Manly and Jorge 2017).

Πιο αναλυτικά, η μέθοδος αποτελείται από τα εξής βήματα:

1. Εφαρμογή Ανάλυσης σε Κύριες Συνιστώσες
 - Κανονικοποίηση των αρχικών p μεταβλητών, ώστε να έχουν μέση τιμή ίση με το μηδέν και διακύμανση ίση με την 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 αποτελεί τη διακύμανση της j -οστής κύριας συνιστώσας και τα στοιχεία του ιδιοδιανύσματος b_j αποτελούν τους συντελεστές, όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.2.2):

$$Z_j = b_{j1}X_1 + b_{j2}X_2 + \dots + b_{jp}X_p \quad (2.2.2)$$

2. Υπολογισμός των X_i ως γραμμικό συνδυασμό των κυρίων συνιστωσών με βάση την εξίσωση (2.2.3):

$$X_i = b_{i1}Z_1 + b_{i2}Z_2 + \dots + b_{ip}Z_p \quad (2.2.3)$$

3. Διατήρηση m κυρίων συνιστωσών βάση της (2.2.4)

$$X_i = b_{i1}Z_1 + b_{i2}Z_2 + \dots + b_{mi}Z_m + e_i \quad (2.2.4),$$

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

4. Μετατροπή των κυρίων συνιστωσών Z_j σε παράγοντες, διαιρώντας αυτές με την τυπική απόκλισή τους, η οποία είναι $\sqrt{\lambda_j}$, έτσι ώστε να έχουν μέση τιμή ίση με το μηδέν και διακύμανση ίση με τη μονάδα. Έτσι η τελευταία εξίσωση γίνεται:

$$X_i = c_{i1}F_1 + c_{i2}F_2 + \dots + c_{im}F_m + e_i \quad (2.2.5),$$

όπου $c_{ij} = \sqrt{\lambda_j} b_{ji}$, $F_j = Z_j / \sqrt{\lambda_j}$, οι οποίες μεταβλητές καλούνται προσωρινοί παράγοντες (provisional factors).

5. Ορθογώνια “varimax” περιστροφή των προσωρινών παραγόντων F_j με σκοπό την εύρεση νέων παραγόντων F_j^* , των οποίων τα φορτία θα είναι μεγαλύτερα κατ’ απόλυτη τιμή από τα προηγούμενα, ώστε η κατάταξη των αρχικών μεταβλητών σε κάποιον παράγοντα να είναι καλύτερη. Αυτό γίνεται εφικτό με τη μεγιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των φορτίων του κάθε παράγοντα F_j , $\sum_{i=1,p} c_{ij}^2$, καθώς αυτό είναι ένα μέτρο της ολικής

διακύμανσης των αρχικών μεταβλητών, που ερμηνεύει ο κάθε παράγοντας j . Προκύπτει έτσι μία καινούρια εξίσωση:

$$X_i = a_{i1}F_1^* + a_{i2}F_2^* + \dots + a_{im}F_m^* + e_i \quad (2.2.6),$$

όπου, οι νέοι παράγοντες F_j^* καλούνται περιστραμμένοι παράγοντες (rotated factors). Στη συνέχεια, προς χάριν απλότητας, οι περιστραμμένοι παράγοντες θα αναφέρονται απλά ως παράγοντες και θα συμβολίζονται με F_j .

Απαραίτητο βήμα κατά την εφαρμογή της Παραγοντικής Ανάλυσης είναι η επιλογή του πλήθους m των παραγόντων που θα διατηρηθούν. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορα κριτήρια. Κάποια από αυτά, ευρέως χρησιμοποιούμενα, είναι:

- **GUTTMAN**: Το πλήθος των παραγόντων που θα διατηρηθούν πρέπει να είναι ίσο με τον αριθμό των ιδιοτιμών του πίνακα συσχετίσεων των αρχικών μεταβλητών, η τομή των οποίων είναι μεγαλύτερη της μονάδας.
- **SCREE**: Οι παράγοντες που πρέπει να διατηρηθούν είναι τόσοι, όσα τα σημεία που αποκλίνουν από την ευθεία γραμμή, σε ένα διάγραμμα των ιδιοτιμών του πίνακα συσχετίσεων, που είναι διατεταγμένες κατά φθίνουσα σειρά.
- **LEV**: Ισχύει το ίδιο με το κριτήριο Scree με τη διαφορά ότι στο διάγραμμα υπάρχουν οι λογάριθμοι των ιδιοτιμών.
- **MONTE CARLO**: Το πλήθος των παραγόντων πρέπει να ισούται με τον αριθμό των ιδιοτιμών που είναι μεγαλύτερες από το 95% εκείνων που προκύπτουν από τη χρήση τυχαίων δεδομένων.
- Αθροιστικό ποσοστό διακύμανσης 80-90% και αποτελέσματα τα οποία επιδέχονται φυσική ερμηνεία (Bartzokas and Metaxas 1993)

Στην παρούσα εργασία, η Παραγοντική Ανάλυση συμβάλλει στη μείωση της διάστασης των αρχικών μετεωρολογικών συνόλων δεδομένων και ο αριθμός των στατιστικά σημαντικών παραγόντων υποδεικνύεται από το διάγραμμα Scree και την φυσική υπόσταση των αποτελεσμάτων (Overland and Preisendorfer 1982, Jolliffe 1986, Bartzokas and Metaxas 1993).

2.2.2 Ανάλυση κατά Συστάδες (Cluster Analysis, CA)

Η Ανάλυση κατά Συστάδες αποτελεί μία στατιστική μέθοδο, σκοπός της οποίας είναι να κατατάξει ένα πλήθος n παρατηρήσεων, που περιγράφονται από m μεταβλητές, σε k ομάδες, έτσι ώστε η κάθε ομάδα να παρουσιάζει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό ομοιογένειας, και να διαφέρει ταυτόχρονα, όσο το δυνατόν περισσότερο από τις υπόλοιπες ομάδες (Sharma 1995). Για την επίτευξη του σκοπού αυτού χρησιμοποιούνται οι αποστάσεις των παρατηρήσεων στον m -διάστατο χώρο, ένα μέτρο των οποίων είναι η ευκλείδεια απόσταση όπως φαίνεται και στην εξίσωση (2.2.7):

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{l=1,m}(x_{il} - x_{jl})^2} \quad (2.2.7),$$

όπου D_{ij} είναι η απόσταση μεταξύ της i και της 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 τέλος m είναι το πλήθος των μεταβλητών, που περιγράφουν την κάθε παρατήρηση.

Για την αποφυγή της επίδρασης των διαφορετικών κλιμάκων, όπου μετρούνται οι μεταβλητές, κανονικοποιούνται οι τιμές των μεταβλητών, με σκοπό όλες οι μεταβλητές να έχουν μέση τιμή ίση με το μηδέν και διακύμανση ίση με την μονάδα.

Υπάρχουν δύο βασικές τεχνικές για την κατάταξη των παρατηρήσεων σε ομάδες, η ιεραρχική και η μη ιεραρχική (k -means). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήσαμε την μη ιεραρχική (k -means).

Η Ανάλυση κατά Συστάδες k -means (k -means Cluster Analysis)

Η Ανάλυση κατά Συστάδες k -means είναι μια στατιστική μέθοδος που ταξινομεί τις περιπτώσεις σε ένα σύνολο δεδομένων σε διακριτές και ομοιογενείς ομάδες (συστάδες) χρησιμοποιώντας το τετράγωνο της Ευκλείδειας απόστασης μεταξύ τους (Sharma 1995). Στην μέθοδο αυτή, θεωρείται γνωστός εκ των προτέρων ο αριθμός των ομάδων, που πρέπει να διατηρηθούν. Συνεπώς, είτε αρχικά με κάποιον τρόπο πρέπει να έχει διαπιστωθεί πόσες θα είναι οι ομάδες στα αρχικά δεδομένα, είτε η μέθοδος θα χρειαστεί να εφαρμοστεί πολλές φορές, για διαφορετικά πλήθη ομάδων, και μέσω κατάλληλων κριτηρίων να επιλεγεί ο τελικός αριθμός των ομάδων, που θα διατηρηθούν.

Τα βήματα της υπολογιστικής διαδικασίας, που ακολουθούνται είναι τα εξής:

1. Επιλογή των αρχικών κέντρων των k ομάδων, μέσω της παρακάτω μεθόδου:
 - Επιλογή των k πρώτων παρατηρήσεων ως αρχικά κέντρα.
 - Υπολογισμός των αποστάσεων των κέντρων μεταξύ τους, αλλά και των υπόλοιπων παρατηρήσεων από τα ήδη υπάρχοντα κέντρα.
 - Όταν η απόσταση μεταξύ δύο κέντρων είναι μικρότερη από την απόσταση κάποιας παρατήρησης από ένα από αυτά τα κέντρα, τότε από τα δυο κέντρα, αυτό με τη μικρότερη απόσταση από την παρατήρηση, αντικαθίσταται από αυτή την παρατήρηση.
 - Επανάληψη του δεύτερου και τρίτου βήματος μέχρι οι αποστάσεις των κέντρων μεταξύ τους να είναι όλες μεγαλύτερες από τις αποστάσεις κάθε παρατήρησης από το κάθε κέντρο.
2. Κατάταξη κάθε παρατήρησης σε μία ομάδα, μέσω του κριτηρίου της απόστασης της παρατήρησης από το κέντρο της ομάδας, να είναι μικρότερη από την απόστασή της από τα κέντρα των υπόλοιπων ομάδων.
3. Έπειτα από την ολοκλήρωση της κατάταξης όλων των παρατηρήσεων σε ομάδες, επαναπροσδιορισμός των κέντρων των ομάδων, χρησιμοποιώντας ως κέντρο το μέσο διάνυσμα των παρατηρήσεων της ομάδας.
4. Επανάληψη των βημάτων 2 και 3, μέχρι να μην υπάρχουν διαφορές ανάμεσα στα προηγούμενα και στα νέα κέντρα των ομάδων.

Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές της διαδικασίας, κυρίως ως προς την επιλογή των αρχικών κέντρων (βήμα 1), η οποία μπορεί να γίνει με μια τυχαία επιλογή των παρατηρήσεων ή με τον καθορισμό τους από τον ερευνητή, αλλά και ως προς τον επαναπροσδιορισμό των κέντρων των ομάδων (βήματα 2 και 3), όπου ο υπολογισμός των καινούριων κέντρων μπορεί να γίνει απευθείας μόλις μία παρατήρηση φύγει από κάποια ομάδα και καταταχθεί σε κάποια άλλη (κινούμενοι μέσοι όροι).

Για την επιλογή του αριθμού των ομάδων που θα διατηρηθούν, υπάρχουν διάφορα στατιστικά τεστ. Ένα από αυτά είναι η μέθοδος του “Άλματος” (“Jump” Method), η οποία βασίζεται στον υπολογισμό της στρέβλωσης (distortion), που αποτελεί ένα μέτρο της διασποράς (dispersion) των παρατηρήσεων για κάθε ομάδα. Με βάση αυτή την μέθοδο, εφαρμόζεται επανειλημμένα η k-means Ανάλυση κατά Συστάδες, για διαφορετικό πλήθος ομάδων k κάθε φορά (Sugar and James 2003).

Κατά την εφαρμογή και με την προϋπόθεση ότι οι μεταβλητές που περιγράφουν την κάθε παρατήρηση είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους, υπολογίζεται η τιμή της στρέβλωσης d_k μέσω της εξίσωσης (2.2.8):

$$d_k = \frac{1}{m} \min_{c_1, \dots, c_k} E[(X - c_x)^T \Gamma^{-1} (X - c_x)] \quad (2.2.8),$$

όπου m είναι το πλήθος των μεταβλητών που περιγράφουν την κάθε παρατήρηση, X μια m-διάστατη τυχαία παρατήρηση, Γ ο πίνακας των συνδιακυμάνσεων (covariance) των m μεταβλητών που περιγράφουν την κάθε παρατήρηση, c_1, c_2, \dots, c_k τα κέντρα των k ομάδων και c_x το πιο κοντινό κέντρο στην παρατήρηση X. Στην περίπτωση αυτή, η στρέβλωση d_k είναι η μέση Mahalanobis απόσταση ανά διάσταση, που εκφράζει την απόσταση μεταξύ δύο παρατηρήσεων στον πολυδιάστατο χώρο λαμβάνοντας υπόψιν τις διακυμάνσεις και συνδιακυμάνσεις τους. Εάν οι m μεταβλητές είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους, τότε ο πίνακας Γ είναι ο μοναδιαίος πίνακας και η στρέβλωση d_k είναι ίση με την μέση τετραγωνική ευκλείδεια απόσταση (Εξίσωση 2.2.9)

$$d_k = \frac{1}{m} \min_{c_1, \dots, c_k} E[(X - c_x)^2] \quad (2.2.9)$$

Σε ένα γράφημα d_k για την επιλογή του αριθμού k, θα ήταν δυνατόν κάποιος να επιλέξει τον αριθμό των ομάδων, διαλέγοντας το k για το οποίο το d_k δε θα άλλαζε σημαντικά και η κλίση της καμπύλης στο γράφημα θα γινόταν σχεδόν οριζόντια. Αυτό θα οδηγούσε στο συμπέρασμα, ότι επιπλέον διαχωρισμός και σε άλλες ομάδες, θα κατέληγε σε σπάσιμο των ήδη ομοιογενών ομάδων σε μικρότερες και δε θα βοηθούσε στην καλύτερη κατάταξη των παρατηρήσεων σε άλλες περισσότερο ομοιογενείς ομάδες.

Ωστόσο, είναι ιδιαίτερα δύσκολο να επιλεγεί το ακριβές σημείο που η κλίση της καμπύλης γίνεται σχεδόν οριζόντια και για τον λόγο αυτό χρειάζεται η ύψωση του σε μία αρνητική δύναμη. Η μετασχηματισμένη, αυτή, καμπύλη παρουσιάζει ένα άλμα για την τιμή του k, που αντιστοιχεί στο πιο κατάλληλο πλήθος ομάδων, όπου μπορούν να καταταχθούν και οι συνολικές παρατηρήσεις. Έπειτα ακολουθεί επιπλέον μετασχηματισμός της καμπύλης αφαιρώντας μεταξύ τους τις συνεχόμενες τιμές των μετασχηματισμένων d_k υπολογίζονται τα άλματα, και έτσι δημιουργείται μία νέα καμπύλη, όπου η τιμή του k για την οποία παρουσιάζεται μέγιστη τιμή του άλματος

είναι το καταλληλότερο πλήθος ομάδων, στις οποίες μπορούν να καταταχθούν οι αρχικές παρατηρήσεις.

Συνοπτικά στην μέθοδο αυτή ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Επανεπιλεγμένη εφαρμογή της Ανάλυσης κατά Συστάδες με τη μέθοδο k-means για διαφορετικό πλήθος ομάδων k κάθε φορά.
2. Υπολογισμός των στρεβλώσεων d_k για την κάθε εφαρμογή της k-means.
3. Επιλογή της δύναμης Y, στην οποία θα υψωθεί η d_k για το μετασχηματισμό. Τυπική τιμή του Y είναι συνήθως το $Y = m/2$, όπου m το πλήθος των μεταβλητών.
4. Υπολογισμός των αλμάτων στη μετασχηματισμένη στρέβλωση, μέσω της σχέσης: $J_k = d_k^{-Y} - d_{k-1}^{-Y}$
5. Στο διάγραμμα του J_k η τιμή k στην οποία αντιστοιχεί η μεγαλύτερη τιμή του J_k , αποτελεί τον καταλληλότερο αριθμό των ομάδων, στις οποίες μπορούν να καταταχθούν οι παρατηρήσεις και υπάρχουν στα αρχικά δεδομένα.

Στην παρούσα εργασία η k-means Ανάλυση κατά Συστάδες εφαρμόστηκε στο σύνολο των παραγόντων που προέκυψε από την παραγοντική ανάλυση, που αναλύθηκε παραπάνω. Ταξινομεί, λοιπόν, τις ημέρες σε ομάδες που ορίζουν τους διάφορους τύπους καιρού. Για την επιλογή του κατάλληλου αριθμού συστάδων, χρησιμοποιήθηκε η δοκιμή παραμόρφωσης (distortion test) (Sugar and James 2003).

2.3 Εφαρμογή της μεθοδολογίας στην παρούσα εργασία

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η δημιουργία μιας αντικειμενικής ταξινόμησης τύπων καιρού για την περιοχή των Ιωαννίνων την τριετή περίοδο 15/2/2019-14/2/2022 και η συσχέτιση αυτών των τύπων, με τα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην συγκεκριμένη περιοχή. Πρώτο σκέλος, λοιπόν, είναι να βρεθούν πόσοι και ποιοι είναι, οι σαφώς διακριτοί τύποι καιρού, που υφίστανται στην περιοχή των Ιωαννίνων. Για τον λόγο αυτόν έγινε χρήση αρχικά της Παραγοντικής Ανάλυσης και έπειτα της Ανάλυσης κατά Συστάδες. Δεύτερο σκέλος, αποτελεί η συσχέτιση αυτών των τύπων καιρού με τα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, το οποίο μελετήθηκε μέσω της ενδοημερήσιας διακύμανσης του κάθε ρύπου για τον κάθε τύπο καιρού.

2.3.1 Εφαρμογή της Παραγοντικής Ανάλυσης

Στην παρούσα εργασία έχουμε τρεις διαφορετικές περιοχές ενδιαφέροντος με ξεχωριστά πλέγματα (στις δυο πρώτες περιπτώσεις) και ξεχωριστές παραμέτρους, στα οποία και εφαρμόστηκε η Παραγοντική Ανάλυση.

Το πρώτο σύνολο παραμέτρων, που αναφέρεται στην περιοχή της νοτιοανατολικής Ευρώπης (30°N-55°N, 0°-40°E), έχει χωρική ανάλυση 1°x1° και περιλαμβάνει 1168336 (1066x1096) ημερήσιες τιμές (12 UTC) του γεωδυναμικού ύψους των ισοβαρικών επιφανειών 500hPa, 1000hPa και της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα στην ισοβαρική επιφάνεια 850hPa.

Το δεύτερο σύνολο παραμέτρων, αντιστοίχως, που αναφέρεται στην ευρύτερη περιοχή της Ηπείρου (38.5°N-40.5°N, 19.5°E-21.5°E), έχει χωρική ανάλυση 0.25°x0.25°, περιλαμβάνει 443880 (405x1096) ημερήσιες ανά εξάωρο τιμές (00, 06, 12,18 και 00επομένης UTC) της θερμοκρασίας του αέρα και του σημείου δρόσου στα 2 μέτρα από την επιφάνεια της γης, της ζωνικής και της μεσημβρινής συνιστώσας του ανέμου στα 10 μέτρα από την επιφάνεια της γης και την ολική νεφοκάλυψη. Από τις παραμέτρους της θερμοκρασίας του αέρα T και της θερμοκρασίας δρόσου Td υπολογίζουμε την τάση και μέγιστη τάση των υδρατμών, μέσω των τύπων $e = 6.112 \cdot \exp\left(\frac{17.67 \cdot T_d}{T_d + 243.5}\right)$, $e_s = 6.112 \cdot \exp\left(\frac{17.67 \cdot T}{T + 243.5}\right)$, αντίστοιχα. Έπειτα, μέσω του τύπου $RH = e/e_s$ υπολογίζουμε την παράμετρο της σχετικής υγρασίας.

Η τρίτη περιοχή ενδιαφέροντος είναι η περιοχή των Ιωαννίνων, και το σύνολο των δεδομένων αντλήθηκε από τον αυτόματο περιβαλλοντικό σταθμό της Περιφέρειας Ηπείρου. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που περιλάμβανε ήταν ωριαίες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα, της σχετικής υγρασίας, της ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου. Από αυτά χρησιμοποιήθηκαν 5480 (5x1096) ημερήσιες ανά εξάωρο τιμές (00, 06, 12,18 και 00επομένης UTC). Από την ταχύτητα και την διεύθυνση ανέμου υπολογίστηκαν η ζωνική και η μεσημβρινή συνιστώσα του ανέμου, μέσω των τύπων: $u = U \cdot \cos(270 - degr)$ και $v = U \cdot \sin(270 - degr)$, όπου U=ταχύτητα ανέμου και degr=διεύθυνση ανέμου.

Για καθεμία από τις τρεις αυτές ομάδες μετεωρολογικών δεδομένων, συντάχθηκαν τρεις πίνακες (Πίνακες 2.3.1, 2.3.2 και 2.3.3). Οι στήλες για τους δυο πρώτους πίνακες αντιστοιχούν στις τιμές των 3 και 5 παραμέτρων, στα 1066 και 405 πλεγματικά σημεία αντίστοιχα, τα οποία καλύπτουν την νοτιοανατολική Ευρώπη και την ευρύτερη περιοχή της Ηπείρου αντιστοίχως (3198 και 2025 στήλες) και οι γραμμές στις ημερομηνίες των αντίστοιχων ημερών (1096 γραμμές). Κατ' αυτόν τον τρόπο κάθε γραμμή περιγράφει την τρισδιάστατη δομή της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας κατά την συγκεκριμένη ημέρα. Για τον τρίτο πίνακα οι στήλες αντιστοιχούν στις τιμές των 4 παραμέτρων (20 στήλες) και οι γραμμές, όπως και πριν, στις ημερομηνίες των αντίστοιχων ημερών (1096 γραμμές).

Πίνακας 2.3. 1: Σχηματική αναπαράσταση του πίνακα που κατασκευάζεται για το πρώτο σύνολο δεδομένων για την νοτιοανατολική Ευρώπη. Η κάθε γραμμή περιλαμβάνει τις τιμές των τριών παραμέτρων σε καθ' ένα από τα 1066 πλεγματικά σημεία για την εκάστοτε ημερομηνία.

Ημερομηνία	Πλεγματικά σημεία											
	1	2	...	1066	1	2	...	1066	1	2	...	1066
15/2/2019	1	2	...	1066	1	2	...	1066	1	2	...	1066
16/2/2019	Γεωδυναμικό ύψος				Γεωδυναμικό ύψος				Θερμοκρασία στα 850hPa			
...	στα 500hPa				στα 1000hPa				T850			
14/2/2022	GH500				GH1000							

Πίνακας 2.3.2: Σχηματική αναπαράσταση του πίνακα που κατασκευάζεται για το δεύτερο σύνολο δεδομένων για την περιοχή της Ηπείρου. Η κάθε γραμμή περιλαμβάνει τις τιμές των πέντε παραμέτρων ανά εξάωρο σε καθ' ένα από τα 405 πλεγματικά σημεία για την εκάστοτε ημερομηνία.

Ημερομηνία	Πλεγματικά σημεία															
	1	2	...	405	1	2	...	405	1	2	...	405	1	2	...	405
15/2/2019	1	2	...	405	1	2	...	405	1	2	...	405	1	2	...	405
16/2/2019	Θερμοκρασία αέρα				Σχετική υγρασία				Νεφοκάλυψη				Ζωνική συνιστώσα			
...	T2m				RH				Tcc				u ανέμου			
14/2/2022																

Πίνακας 2.3.3: Σχηματική αναπαράσταση του πίνακα που κατασκευάζεται για το τρίτο σύνολο δεδομένων για την περιοχή των Ιωαννίνων. Η κάθε γραμμή περιλαμβάνει τις τιμές των τεσσάρων παραμέτρων ανά εξάωρο για την εκάστοτε ημερομηνία.

15/2/2019	1	2	...	20	1	2	...	20	1	2	...	20	1	2	...	20
16/2/2019	Θερμοκρασία αέρα				Σχετική υγρασία				Ζωνική συνιστώσα				Μεσημβρινή συνιστώσα			
...	T				RH				u ανέμου				v ανέμου			
14/2/2022																

Σε καθένα από τους παραπάνω Πίνακες εφαρμόζεται η Παραγοντική Ανάλυση με σκοπό την μείωση του πλήθους των συνολικά $1066 \times 3 = 3198$ αρχικών μεταβλητών (Πίνακας 2.3.1), $405 \times 5 = 2025$ μεταβλητών (Πίνακας 2.3.2) και $20 \times 4 = 80$ μεταβλητών (Πίνακας 2.3.3). Κατά την εφαρμογή της ανάλυσης αποφασίζεται το πλήθος των παραγόντων που θα διατηρηθούν κάθε φορά, με βάση το κριτήριο του Scree και την προϋπόθεση ότι όλοι οι παράγοντες που προκύπτουν θα πρέπει να έχουν υψηλά (>0.7) φορτία (loadings) σε τουλάχιστον 1% των χρονοσειρών και επομένως να είναι φυσικά ερμηνεύσιμοι (Jolliffe 1993).

Πιο συγκεκριμένα, για το πρώτο σύνολο παραμέτρων, έχουμε 3198 αρχικές μεταβλητές, καθεμία από τις οποίες αποτελείται από 1096 ημερήσιες τιμές. Κάθε χρονοσειρά αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη μετεωρολογική παράμετρο και ώρα παρατήρησης. Για το δεύτερο σύνολο παραμέτρων, έχουμε αρχικά 2025 μεταβλητές, καθεμία από τις οποίες και πάλι αποτελείται από 1096 ημερήσιες τιμές. Τέλος, για το τρίτο σύνολο, έχουμε 80 αρχικές μεταβλητές, καθεμία από τις οποίες περιέχει 1096 ημερήσιες τιμές.

Όσον αφορά τον προσδιορισμό του αριθμού των συνιστωσών, με βάση τα παραπάνω προέκυψαν στην πρώτη περίπτωση 6 παράγοντες, στη δεύτερη 5 παράγοντες και στην τρίτη 7 παράγοντες. Στους Πίνακες 2.3.4 – 2.3.6 παρουσιάζονται τα ποσοστά διακύμανσης των παραγόντων για τις τρεις εφαρμογές της Παραγοντικής Ανάλυσης.

Πίνακας 2.3.4: Παρουσίαση των ιδιοτιμών και του ποσοστού της διακύμανσης (%) η οποία ερμηνεύεται από κάθε παράγοντα για την περιοχή της ΝΑ Ευρώπης.

Συνολική διακύμανση			
Παράγοντας	Ολική διακύμανση	Μεταβλητότητα	Αθροιστική
			μεταβλητότητα %
1	971.456	30.377	30.377
2	699.815	21.883	52.260
3	357.587	11.182	63.441
4	342.434	10.708	74.149
5	227.313	7.108	81.257
6	181.060	5.662	86.919

Στον Πίνακα 2.3.4 εμφανίζονται οι ιδιοτιμές και τα ποσοστά της διακύμανσης που ερμηνεύουν οι 6 παράγοντες που προέκυψαν για την περιοχή της ΝΑ Ευρώπης μετά από ορθογώνια (varimax) περιστροφή των αξόνων, οι οποίοι ερμηνεύουν συνολικά το 86.9% της ολικής μεταβλητότητας.

Πίνακας 2.3.5: Παρουσίαση των ιδιοτιμών και του ποσοστού της διακύμανσης (%) η οποία ερμηνεύεται από κάθε παράγοντα για την περιοχή της Ηπείρου..

Συνολική διακύμανση			
Παράγοντας	Ολική διακύμανση	Μεταβλητότητα	Αθροιστική
			μεταβλητότητα %
1	447.421	22.095	22.095
2	335.855	16.585	38.680
3	262.143	12.945	51.626
4	232.223	11.468	63.093
5	119.281	5.890	68.984

Στον Πίνακα 2.3.5 εμφανίζονται οι ιδιοτιμές και τα ποσοστά της διακύμανσης που ερμηνεύουν οι 5 παράγοντες που προέκυψαν για την περιοχή της Ηπείρου μετά από ορθογώνια (varimax) περιστροφή των αξόνων, οι οποίοι ερμηνεύουν συνολικά το 69% της ολικής μεταβλητότητας.

Πίνακας 2.3.6: Παρουσίαση των ιδιοτιμών και του ποσοστού της διακύμανσης (%) η οποία ερμηνεύεται από κάθε παράγοντα για τα μετεωρολογικά δεδομένα του περιβαλλοντικού σταθμού.

Συνολική διακύμανση			
Παράγοντας	Ολική διακύμανση	Μεταβλητότητα	Αθροιστική
			μεταβλητότητα %
1	4.743	23.713	23.713
2	3.728	18.639	42.353
3	1.775	8.877	51.229
4	1.379	6.894	58.123
5	1.372	6.859	64.982
6	1.293	6.463	71.445
7	1.291	6.455	77.900

Στον Πίνακα 2.3.6 εμφανίζονται οι ιδιοτιμές και τα ποσοστά της διακύμανσης που ερμηνεύουν οι 4 παράγοντες που προέκυψαν για τα μετεωρολογικά δεδομένα του περιβαλλοντικού σταθμού μετά από ορθογώνια (varimax) περιστροφή των αξόνων, οι οποίοι ερμηνεύουν συνολικά το 77.9% της ολικής μεταβλητότητας.

Μετά την εφαρμογή αυτή, δημιουργούνται τρεις νέοι Πίνακες με στήλες, αυτή τη φορά, τους παράγοντες και γραμμές την ημερομηνία της ημέρας. (Πίνακες 2.3.7, 2.3.8, 2.3.9)

Πίνακας 2.3.7: Σχηματική αναπαράσταση του πίνακα που προκύπτει μετά την εφαρμογή της Παραγοντικής Ανάλυσης στον αρχικό πίνακα 2.3.1 και περιλαμβάνει μεγάλο μέρος της πληροφορίας του

Ημερομηνία	Fact1	Fact2	...	Fact5
15/2/2019	Τιμές επίδοσης των παραγόντων			
16/2/2019	που ερμηνεύουν μεγάλο μέρος της			
...	πληροφορίας των αρχικών μεταβλητών			
14/2/2022	και έχουν υψηλά loadings (>0.7)			

Πίνακας 2.3.8: Σχηματική αναπαράσταση του πίνακα που προκύπτει μετά την εφαρμογή της Παραγοντικής Ανάλυσης στον αρχικό πίνακα 2.3.2 και περιλαμβάνει μεγάλο μέρος της πληροφορίας του

Ημερομηνία	Fact1	Fact2	...	Fact6
15/2/2019	Τιμές επίδοσης των παραγόντων			
16/2/2019	που ερμηνεύουν μεγάλο μέρος της			
...	πληροφορίας των αρχικών μεταβλητών			
14/2/2022	και έχουν υψηλά loadings (>0.7)			

Πίνακας 2.3.9: Σχηματική αναπαράσταση του πίνακα που προκύπτει μετά την εφαρμογή της Παραγοντικής Ανάλυσης στον αρχικό πίνακα 2.3.3 και περιλαμβάνει μεγάλο μέρος της πληροφορίας του

Ημερομηνία	Fact1	Fact2	...	Fact7
15/2/2019	Τιμές επίδοσης των παραγόντων			
16/2/2019	που ερμηνεύουν μεγάλο μέρος της			
...	πληροφορίας των αρχικών μεταβλητών			
14/2/2022	και έχουν υψηλά loadings (>0.7)			

Αυτούς τους νέους Πίνακες που έχουν προκύψει, τους συνενώνουμε σε έναν ενιαίο Πίνακα, όπου οι στήλες αντιστοιχούν στους παράγοντες και οι γραμμές στο χρόνο, (Πίνακας 2.3.10).

Πίνακας 2.3.10: Σχηματική αναπαράσταση του ενοποιημένου πίνακα που προκύπτει από την συνένωση των τριών προηγούμενων

Ημερομηνία	Fact1	...	Fact6	Fact1	...	Fact5	Fact1	...	Fact7
15/2/2019	Τιμές επίδοσης παραγόντων			Τιμές επίδοσης παραγόντων			Τιμές επίδοσης παραγόντων		
16/2/2019	πίνακα 1			πίνακα 2			πίνακα 3		
...									
14/2/2022									

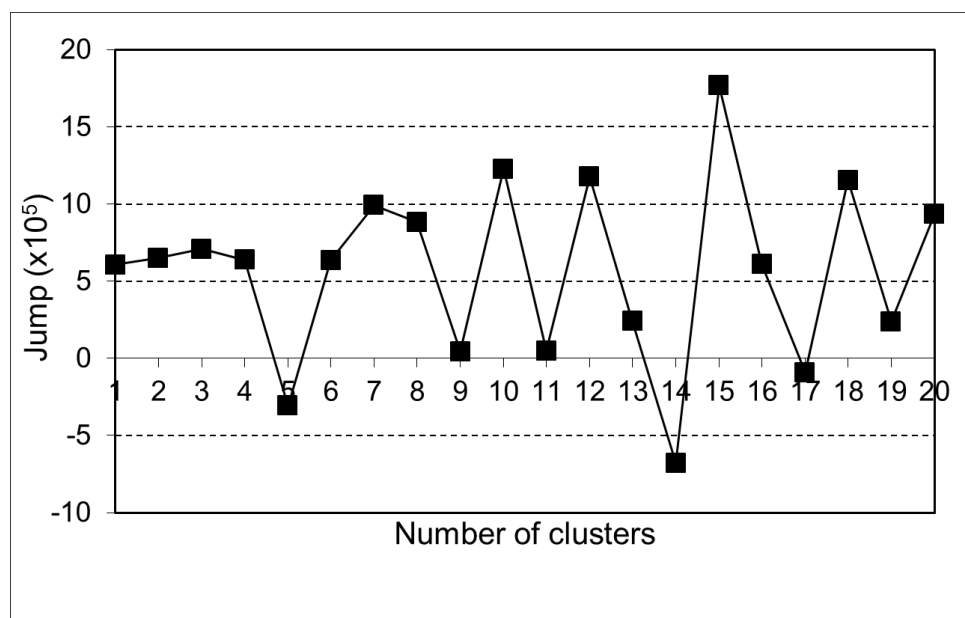
2.3.2 Εφαρμογή της Ανάλυσης κατά Συστάδες k-means

Στον ενοποιημένο Πίνακα 2.3.10 εφαρμόζεται η k-means Ανάλυση κατά Συστάδες, με σκοπό την αντικειμενική κατάταξη των ημερομηνιών με βάση όλες τις μετεωρολογικές παραμέτρους, σε ομοιογενείς και όσο το δυνατόν διαφορετικές μεταξύ τους ομάδες πλήθους k, τους ζητούμενους, δηλαδή, τύπους καιρού (Weather Types, WT). Για την επιλογή του πλήθους των ομάδων χρησιμοποιείται το distortion test της μεθόδου του “Άλματος”, με στόχο οι ομάδες που προκύπτουν να επιδέχονται μια φυσική ερμηνεία (Sugar and James 2003).

Για την επιλογή αυτή, λαμβάνουμε υπόψιν το γράφημα των αλμάτων J_k (διαφορών της μετασχηματισμένης στρέβλωσης $J_k = d_k^{-Y} - d_{k-1}^{-Y}$ που έχουν υπολογιστεί για την κάθε περίπτωση k πλήθους ομάδων. Ο αριθμός k ομάδων, για τον οποίο το άλμα J_k παρουσιάζει μεγάλη τιμή, είναι το κατάλληλο πλήθος ομοιογενών και διαφορετικών μεταξύ τους ομάδων, όπου και μπορούν να καταταγούν οι n παρατηρήσεις. Από τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου του “Άλματος” γίνεται φανερό ότι το καταλληλότερο πλήθος ομάδων για την κατάταξη των μετεωρολογικών παραμέτρων δεν είναι ένας και μοναδικός αριθμός, αλλά ανάμεσα στους καταλληλότερους από

αυτούς αριθμούς, επιλέγεται κάθε φορά ένας, λαμβάνοντας υπόψιν τη φυσική ερμηνεία των τύπων καιρού που θα προκύψουν.

Στο Σχήμα 2.3.1, παρουσιάζεται το γράφημα των αλμάτων σε σχέση με το πλήθος των ομάδων.



Σχήμα 2.3.1: Γράφημα των αλμάτων σε σχέση με τον αριθμό των ομάδων.

Από τη μελέτη του γραφήματος του Σχήματος 2.3.1, για την επιλογή του βέλτιστου αριθμού συστάδων, αποφασίζεται ότι το καταλληλότερο πλήθος ομάδων, που πρέπει να επιλεγεί, έτσι ώστε να είναι ομοιογενείς αλλά και αρκετά διαφορετικές μεταξύ τους είναι 12. Με άλλα λόγια, το συνολικό πλήθος των ημερομηνιών της τριετίας ενδιαφέροντος 15/2/2019-14/2/2022 κατατάχθηκε σε 12 διαφορετικούς τύπους καιρού, με βάση τα χαρακτηριστικά των μετεωρολογικών παραμέτρων.

Στον Πίνακα 2.3.11, που ακολουθεί γίνεται μία σχηματική αναπαράσταση της κατάταξης των ημερομηνιών στις ομοιογενείς ομάδες - τύπους καιρού, αφότου έχει εφαρμοστεί η k-means Ανάλυση κατά Συστάδες.

Πίνακας 2.3.11: Σχηματική αναπαράσταση της κατάταξης των ημερομηνιών σε ομοιογενείς ομάδες, έπειτα από την εφαρμογή της Ανάλυσης κατά Συστάδες k-Means.

	Ομάδα 1	Ομάδα 2	...	Ομάδα 12
14/2/2019	17/9/2020	15/6/2019		29/10/2020
έως	28/3/2019	23/9/2021		16/10/2021
15/2/2022				
	7/4/2020	26/9/2021		2/2/2022

Έπειτα, σχεδιάζονται μέσω του προγράμματος Surfer, οι μέσοι χάρτες για κάθε τύπο καιρού που έχει προκύψει για τις συνολικά 7 μετεωρολογικές παραμέτρους, που θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο.

2.3.3 Επεξεργασία των δεδομένων ρύπανσης

Δεύτερο σκέλος του σκοπού της εργασίας, αποτελεί η συσχέτιση αυτών των τύπων καιρού που βρέθηκαν παραπάνω με τα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Για τον σκοπό αυτό, έγινε μελέτη της ενδοημερήσιας διακύμανσης του κάθε ρύπου για τον κάθε τύπο καιρού με την εφαρμογή του Microsoft Excel.

Αρχικά, από τον περιβαλλοντικό σταθμό της Περιφέρειας Ηπείρου κατεβάσαμε τα δεδομένα των ρύπων. Πρόκειται για ωριαίες τιμές των συγκεντρώσεων βασικών ατμοσφαιρικών ρύπων, και πιο συγκεκριμένα των σωματιδίων PM1, PM2.5, PM4, PM10, και αερίων NO, NO₂, NO_x, CO, SO₂ και O₃, μετρούμενα σε μικρογραμμάρια ανά κυβικό μέτρο, μg/m³ εκτός από το NO_x, το οποίο μετρείται σε μέρη στο δισεκατομμύριο, ppb. Τα δεδομένα αυτά αντιστοιχούσαν σε τοπική χειμερινή ώρα, κάτι το οποίο απαιτούσε την μετατροπή της τοπικής χειμερινής σε utc ώρα, μέσω του τύπου $utc = local - 2$. Δημιουργήθηκε λοιπόν ένα σύνολο δεδομένων για τις συγκεντρώσεις των 10 ρύπων, καθένας από τους οποίους περιλάμβανε τιμές συγκέντρωσης για την κάθε ώρα της κάθε ημέρας, την τριετή χρονική περίοδο μελέτης. Σχηματικά αναπαρίσταται στον Πίνακα 2.3.12:

Πίνακας 2.3.12: Σχηματική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων των ρύπων για την κάθε ώρα της κάθε ημέρας της τριετίας ενδιαφέροντος.

Ημερομηνία	Ωρα	Ρύποι			
		PM1	PM2.5	...	O ₃
15/2/2019	0	Τιμές συγκεντρωσης κάθε ρύπου			
15/2/2019	1				
...	...				
14/2/2022	22				
14/2/2022	23				

Πρώτο βήμα ήταν να διαχωρίσουμε για κάθε τύπο καιρού τις ωριαίες τιμές των ρύπων που αντιστοιχούσαν σε αυτόν, δημιουργώντας 12 τέτοιους πίνακες (Πίνακας 2.3.13) για τους 12 διαφορετικούς τύπους καιρού. Στόχος αυτού ήταν η μελέτη, ξεχωριστά για τον κάθε τύπο καιρού, της ενδοημερήσιας διακύμανσης του κάθε ρύπου. Έτσι, κατασκευάστηκαν 10 διαγράμματα, ένα για κάθε ρύπο, 12 φορές, για καθέναν από τους τύπους καιρού, όπου αναπαρίσταται η ενδοημερήσια διακύμανση, και θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 3.

Πίνακας 2.3.13: Σχηματική αναπαράσταση για τον κάθε τύπο καιρού (WT) των ωριαίων συγκεντρώσεων των ρύπων

WT1	Ρύποι			
Ωρα	PM1	PM2.5	...	O ₃
0	Τιμές συγκέντρωσης του κάθε ρύπου			
1				
...				
23				

Ταυτόχρονα, υπολογίστηκε η μέση ημερήσια τιμή του κάθε ρύπου, και προστέθηκε η στήλη των τύπων καιρού (WT) που αντιστοιχούν στην κάθε ημέρα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.3.14.

Πίνακας 2.3.14: Σχηματική αναπαράσταση της μέσης τιμής των συγκεντρώσεων των ρύπων για την κάθε ημέρα και συσχέτιση με τον κάθε τύπο καιρού.

Ημερομηνία	WT	Ρύποι			
		PM1	PM2.5	...	O ₃
15/2/2019	9	Τιμές συγκεντρωσης κάθε ρύπου			
16/2/2019	9				
...	...				
13/2/2022	7				
14/2/2022	5				

Ακολούθησε ο διαχωρισμός για τον κάθε τύπου καιρού της μέσης ημερήσιας τιμής των αντίστοιχων ρύπων. Αποτέλεσμα αυτού, ήταν για κάθε τύπο καιρού να υπολογιστεί η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του κάθε ρύπου, όπως αναπαρίσταται στον Πίνακα 2.3.15. Με αυτόν τον τρόπο, κατασκευάστηκαν ιστογράμματα, για τον κάθε ρύπο, τα οποία θα παρουσιαστούν παρακάτω, όπου παρουσιάζεται η μέση τιμή της συγκέντρωσής του για κάθε τύπο καιρού.

Πίνακας 2.3.15: Σχηματική αναπαράσταση της μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης των συγκεντρώσεων των ρύπων για κάθε τύπο καιρού.

WT	Ρύποι			
	PM1	PM2.5	...	O ₃
1	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση των συγκεντρώσεων κάθε ρύπου			
2				
...				
12				

Στην συνέχεια, με βάση τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (W.H.O) και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, οι οποίες έχουν θεσπίσει κάποιες δεσμευτικές οριακές τιμές για την μέγιστη συγκέντρωση συγκεκριμένων ρύπων που επιτρέπονται στην ατμόσφαιρα, με σκοπό να διατηρείται η ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα σε ανεκτά, για τον άνθρωπο, επίπεδα, μελετήθηκε για την περίοδο και περιοχή μελέτης μας κατά πόσο και ποιοι ρύποι ξεπερνούν αυτά τα όρια.

Για όσους ρύπους, λοιπόν, υπερέβησαν τα θεσπισμένα όρια, έγινε μια επιπλέον μελέτη, και κατασκευάστηκαν, μέσω και πάλι του Microsoft Excel, για καθέναν τέτοιο ρύπο, δύο ειδών ιστογράμματα, ένα, όπου παρουσιάζεται η συγκέντρωση (PM2.5) και ο αριθμός περιπτώσεων υπέρβασης ορίων (PM10 και O₃) ανά τύπο καιρού και, ομοίως, ένα όπου παρουσιάζεται η συγκέντρωση (PM2.5) και ο αριθμός περιπτώσεων υπέρβασης ορίων (PM10 και O₃) ανά ολοκληρωμένο έτος. Τέλος, για αυτούς τους ρύπους και συγκεκριμένα για τους τύπους καιρού που εμφανίζουν το «πρόβλημα» υπέρβασης ορίων μελετήθηκε η εξέλιξη της συγκέντρωσης των ρύπων για ακολουθία συνεχόμενων ημερών εμφάνισης του ίδιου τύπου καιρού, μέσω της δημιουργίας αντίστοιχων διαγραμμάτων, που θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Τύποι καιρού και επίπεδα ρύπανσης

Βάση της διαδικασίας που περιγράφηκε στο εδάφιο 2.3.2, βρέθηκαν 12 διαφορετικοί τύποι καιρού (WT) για την τριετία 15/2/2019-14/2/2022, κάθε μέρα της οποίας ανήκει σε έναν από τους 12 αυτούς τύπους καιρού.

Από τους 12 τύπους καιρού (WTs), οι 6 αντιστοιχούν στην ψυχρή περίοδο του έτους, οι 2 WTs αντιστοιχούν στην θερμή περίοδο του έτους και οι υπόλοιποι 4 σε μεταβατικές περιόδους.

Ξεχωριστά για τον κάθε τύπο καιρού, κατασκευάστηκαν ιστογράμματα, όπου παρουσιάζεται ο αριθμός των περιπτώσεων-ημερών ανά μήνα στη διάρκεια της τριετίας. Παράλληλα, σχεδιάστηκαν μέσοι χάρτες του γεωδυναμικού ύψους των ισοβαρικών επιφανειών 500hPa και 1000hPa, της θερμοκρασίας του αέρα στην ισοβαρική επιφάνεια 850hPa, για την περιοχή της νοτιοανατολικής Ευρώπης, της θερμοκρασίας του αέρα στα 2 μέτρα από την επιφάνεια της γης, της σχετικής υγρασίας, της νεφοκάλυψης και των διανυσμάτων του ανέμου για την ευρύτερη περιοχή της Ηπείρου, οι οποίοι φαίνονται και αναλυτικά παρακάτω. Τέλος, για τον κάθε τύπο καιρού, δημιουργήθηκαν για κάθε ρύπο ξεχωριστά, διαγράμματα, όπου φαίνεται η ενδοημερήσια πορεία της συγκέντρωσής τους. Όλα αυτά παρουσιάζονται παρακάτω αναλυτικά ανά τύπο καιρού.

Τέλος, κατασκευάστηκαν δύο ειδών ιστογράμματα. Το πρώτο αφορά για τον κάθε μήνα ξεχωριστά, τον αριθμό ημερών ανά τύπο καιρού και το δεύτερο για κάθε ρύπο ξεχωριστά, τη μέση συγκέντρωσή του ανά τύπο καιρού. Τα ιστογράμματα αυτά παρουσιάζονται μετά την ανάλυση του κάθε τύπου καιρού. Τα κύρια χαρακτηριστικά των 12 τύπων καιρού που βρέθηκαν είναι τα εξής:

- **WT1:** Ο WT1 (Σχήμα 3.1.1) είναι ένας WT των μεταβατικών εποχών του έτους, καθώς εμφανίζεται κυρίως τους μήνες Μάρτιο και Σεπτέμβριο. Στον συγκεκριμένο WT ανήκει σημαντικά μικρός αριθμός περιπτώσεων-ημερών για αυτό και η μικρή συχνότητα εμφάνισής του. Στη στάθμη των 500hPa σχηματίζεται ένας αυλώνας στην περιοχή της κεντρικής Μεσογείου, συμπεριλαμβανομένης Ιταλίας και Ελλάδας, ενώ στην κατώτερη τροπόσφαιρα παρατηρούμε ένα σύστημα σχετικά υψηλών πιέσεων στην Ιβηρική χερσόνησο και στο βόρειο κομμάτι. Υπάρχει ένα υψηλό στην κεντρική Ευρώπη και ένα χαμηλό στη ΝΑ Μεσόγειο. Ο συνδυασμός των δύο συστημάτων προκαλεί ΒΑ ανέμους στην περιοχή των Ιωαννίνων. Οι θερμοκρασίες στην περιοχή της Ηπείρου είναι κανονικές για την εποχή επικράτησης του WT (15-19°C). Η σχετική υγρασία κυμαίνεται σε ποσοστά πάνω από 50%, και επικρατεί υψηλή νεφοκάλυψη ανατολικά της Πίνδου, λόγω της ΒΑ ροής. Είναι αντιληπτό ότι σχεδόν όλοι οι ρύποι (Σχήμα 3.1.2) ακολουθούν μια ομαλή πορεία, ως προς την συγκέντρωσή τους, κι αυτό συμβαίνει διότι ο WT1 είναι ένας τύπος με μέτρια βορειοανατολική ροή και όχι ιδιαίτερα χαμηλές θερμοκρασίες ή κάποια άλλα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά που να ευνοούν τη συσσώρευση ρύπων.

Παρατηρείται μόνο μια σχετική υψηλή συγκέντρωση του O₃, η οποία ίσως οφείλεται στην πιθανή υψηλή ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή.

- **WT2:** Ο WT2 (Σχήμα 3.1.3) είναι ένας WT της θερμής περιόδου του έτους, μιας και εμφανίζεται από το Μάιο έως το Σεπτέμβριο, με μέγιστο εμφάνισης τον Ιούλιο και τον Αύγουστο. Χαρακτηρίζεται από τυπικές καλοκαιρινές συνοπτικές συνθήκες στα Βαλκάνια που σχετίζονται με αντικυκλωνική δραστηριότητα, ασθενείς ΒΔ ανέμους, ιδιαίτερα καθαρό ουρανό και έντονη ηλιοφάνεια. Οι θερμοκρασίες στην ευρύτερη περιοχή της Ηπείρου είναι οι υψηλότερες όλων των τύπων καιρού ενώ η σχετική υγρασία θεωρείται μέτρια έως χαμηλή. Ως προς τη στάθμη των 500hPa, φαίνεται ότι δημιουργείται ένα ridge (υψηλές πιέσεις) πάνω στην περιοχή της Ελλάδας, ενώ στα 1000hPa επικρατεί η τυπική θερινή κυκλοφορία με το συνδυασμό του θερμικού χαμηλού της ΝΔ Ασίας με τις υψηλές πιέσεις πάνω από την Ευρώπη. Σε ό,τι αφορά τους ρύπους (Σχήμα 3.1.4), ο μόνος του οποίου η συγκέντρωση παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλή συγκέντρωση είναι το O₃ και μάλιστα κυρίως κατά τη διάρκεια της ημέρας, λόγω της ηλιοφάνειας, της υψηλής θερμοκρασίας και της ισχυρής ηλιακής ακτινοβολίας που επικρατεί αυτές τις ώρες κατά την επικράτηση του συγκεκριμένου τύπου καιρού.
- **WT3:** Ο WT3 (Σχήμα 3.1.5) είναι ένας σχετικά χειμερινός WT, που ωστόσο έχει περιπτώσεις μικρής εμφάνισης όλους τους μήνες, εκτός από τον Ιούλιο, με μέγιστα εμφάνισης τους μήνες Ιανουάριο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο. Τα ποσοστά της σχετικής υγρασίας είναι ιδιαίτερα υψηλά. Χαρακτηρίζεται από έναν αυλώνα χαμηλών γεωδυναμικών υψών στη μέση τροπόσφαιρα και ένα βαρομετρικό χαμηλό στην επιφάνεια δυτικά της Ελλάδας, από νότιους μέτριους ανέμους, μέτριες θερμοκρασίες και σχετικά μέτρια νεφοκάλυψη στην περιοχή των Ιωαννίνων. Ως προς τους ρύπους (Σχήμα 3.1.6), τα PM παρουσιάζουν μέγιστο τις πρώτες βραδινές ώρες λόγω των κεντρικών θερμάνσεων. Μια μικρή αύξηση κατά τις πρωινές και πρώτες βραδινές ώρες παρουσιάζουν τα NO, NO₂, NO_x και ελάχιστη μεταβολή παρουσιάζουν τα CO και SO₂. Τα μέγιστα της συγκέντρωσης των NO, NO₂, NO_x τις πρωινές και πρώτες βραδινές ώρες σχετίζονται με τις μέτριες θερμοκρασίες και την πιθανή ηλιοφάνεια, που επιτρέπουν τη φωτοχημική δραστηριότητα να προχωρήσει και το εκπεμπόμενο ή σχηματιζόμενο NO₂ να παραμείνει γύρω από τις πηγές του. Επιπλέον, οι ρύποι αυτοί προκαλούνται και από την κυκλοφορία, και έτσι η συμπεριφορά τους αντικατοπτρίζει τις συνθήκες κυκλοφορίας που επικρατούν στην πόλη. Τέλος, το O₃, λόγω της πιθανής ηλιοφάνειας εμφανίζει και αυτό μια αύξηση συγκέντρωσης τις πρώτες μεσημεριανές ώρες.
- **WT4:** Ο WT4 (Σχήμα 3.1.7) ανήκει στην κατηγορία των μεταβατικών WTs, με μέγιστο εμφάνισης το Μάρτιο και το Σεπτέμβριο, όπως και στον WT1. Για την περιοχή της Ηπείρου εμφανίζει ΒΑ ανέμους, μέτριες θερμοκρασίες που κυμαίνονται γύρω στους 15-20 °C, ήπια νεφοκάλυψη, σχετικά έντονη ηλιοφάνεια και περιορισμένη σχετική υγρασία. Στη στάθμη των 500hPa σχηματίζεται ένας αυλώνας στην περιοχή της κεντρικής Μεσογείου, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας, ενώ στην κατώτερη τροπόσφαιρα παρατηρούμε ένα σύστημα υψηλών πιέσεων στο βόρειο τμήμα της Ευρώπης.

Ως προς την θερμοκρασία στα 850hPa είναι κανονική για την εποχή προς ψυχρή. Οι συγκεντρώσεις σχεδόν όλων των ρύπων στον WT4 (Σχήμα 3.1.8) έχουν μια ομαλή πορεία εντός του 24ώρου χωρίς σημαντικά μέγιστα ή ελάχιστα. Αυτό οφείλεται στην ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου που συμβάλλει στην αραίωση των ρύπων και τον «καθαρισμό» της ατμόσφαιρας της πόλης. Αυτό, ωστόσο, δεν ισχύει για το O₃, καθώς η απουσία οξειδίων του αζώτου στην ατμόσφαιρα ευνοεί την παραμονή του, και μιας και επικρατούν αρκετά υψηλές τιμές της ταχύτητας του ανέμου, τα επίπεδα συγκέντρωσης του παραμένουν σχετικά υψηλά και λόγω και της ισχυρής ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτός είναι και ο λόγος που η συγκέντρωση του O₃ φαίνεται να είναι αυξημένη καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.

- **WT5:** Ο WT5 (Σχήμα 3.1.9) είναι ένας WT της χειμερινής περιόδου του έτους. Εμφανίζεται από τον Οκτώβριο έως τον Απρίλιο, με μέγιστο εμφάνισή τους μήνες Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο. Χαρακτηρίζεται από κανονικές για την εποχή προς χαμηλές θερμοκρασίες, μέτρια νεφοκάλυψη και ασθενείς Δ-ΝΔ ανέμους. Είναι εμφανής, μια ράχη υψηλών γεωδυναμικών υψών πάνω από τα Βαλκάνια, που σχετίζεται με αντικυκλωνικές συνθήκες κοντά στην επιφάνεια. Τέτοιες αντικυκλωνικές συνθήκες ευνοούν την καθίζηση, τον καθαρό ουρανό, την αναστροφή της επιφάνειας και τις σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες τη νύχτα και νωρίς το πρωί. Αυτές οι συνθήκες ευνοούν, αφενός τη συσσώρευση ατμοσφαιρικών ρύπων στα χαμηλότερα τροποσφαιρικά επίπεδα λόγω της απουσίας οριζόντιας και κάθετης ανάμειξης και αφετέρου της εκπομπής ρύπων που σχετίζονται με την καύση βιομάζας λόγω της θέρμανσης των κατοικιών. Αυτό μπορεί να δικαιολογήσει τις υψηλότερες συγκεντρώσεις σχεδόν όλων των ρύπων (εκτός από το O₃) (Σχήμα 3.1.10). Οι υψηλές συγκεντρώσεις των ρύπων PM, CO, SO₂ ιδιαίτερα τις πρώτες βραδινές ώρες που λειτουργούν περισσότερο οι κεντρικές θερμάνσεις σχετίζονται άμεσα με τις χαμηλές θερμοκρασίες. Το CO εξαρτάται σημαντικά, όχι μόνο από τις συνθήκες ατμοσφαιρικής διάχυσης αλλά και από τους ρυθμούς εκπομπής. Ταυτόχρονα, λόγω των ασθενών ανέμων που επικρατούν, δεν ευνοείται η διασπορά και η διάχυση των ρύπων, με αποτέλεσμα τη συσσώρευσή τους. Ως προς το O₃, η συγκέντρωσή του δεν παρουσιάζεται ιδιαίτερη υψηλή, πλην των μεσημεριανών ωρών, που συγκριτικά με τον WT2 είναι πολύ μικρή.
- **WT6:** Ο WT6 (Σχήμα 3.1.11) είναι ο δεύτερος θερινός WT, ο οποίος και εμφανίζεται από τον Απρίλιο μέχρι τον Οκτώβριο. Χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλές θερμοκρασίες, μέτρια προς υψηλή σχετική υγρασία, καθαρό ουρανό και έντονη ηλιοφάνεια. Οι άνεμοι που πνέουν είναι μέτριοι ΒΔ και ενισχύονται ιδιαίτερα από την θαλάσσια αύρα την ημέρα. Η θερμοκρασία στην επιφάνεια των 850hPa είναι μέτρια προς υψηλή. Όλες οι συγκεντρώσεις των ρύπων (Σχήμα 3.1.12) ακολουθούν μια σχετικά σταθερή ενδοημερήσια διακύμανση, εκτός του O₃, που λόγω της έντονης ηλιακής ακτινοβολίας και των υψηλών θερμοκρασιών παρουσιάζει ισχυρό μέγιστο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Πιθανότατα, λόγω των μέτριων ΒΔ ανέμων ενισχύεται η διασπορά και απομάκρυνση των περισσότερων ρύπων.

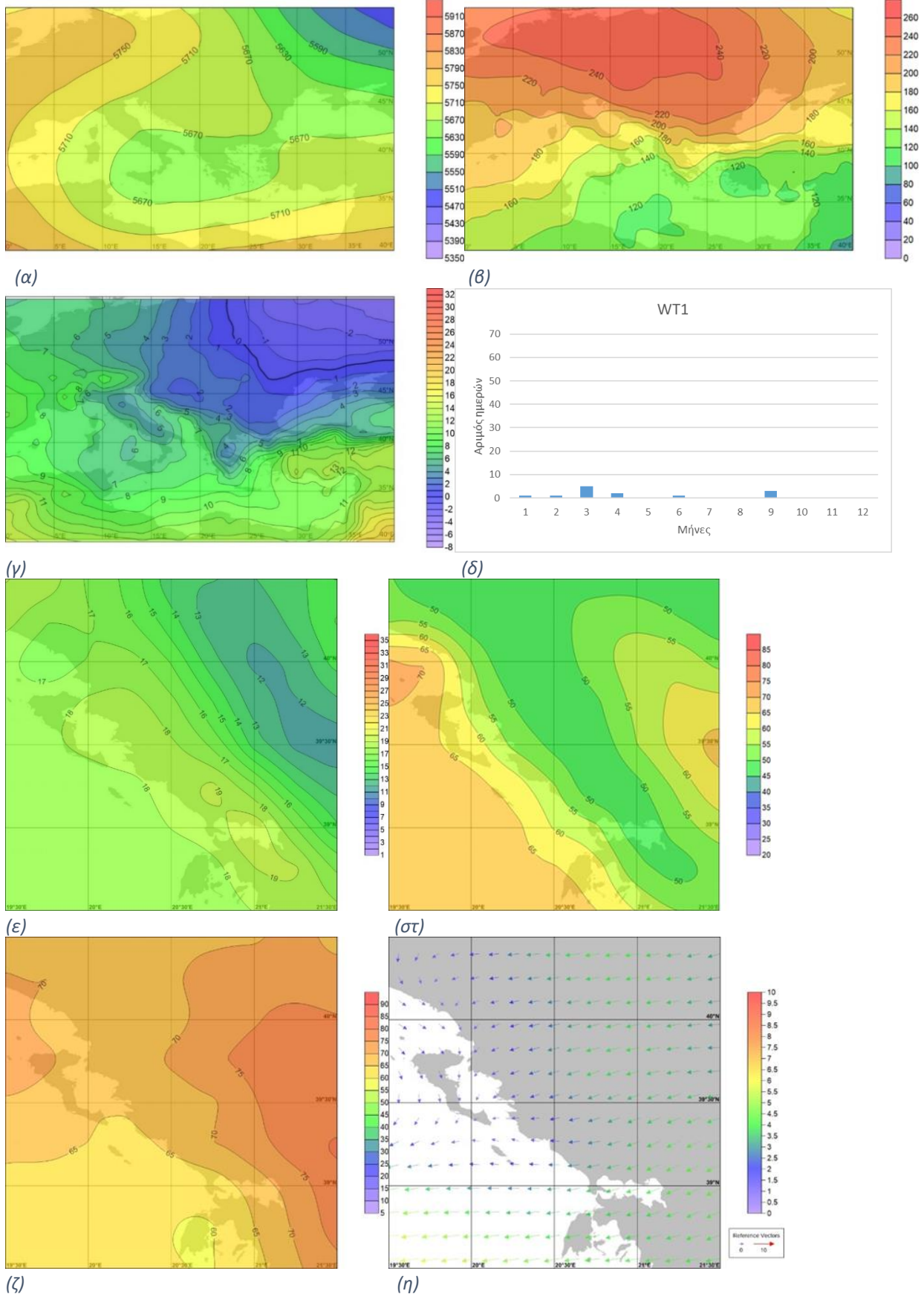
- **WT7:** Ο WT7 (Σχήμα 3.1.13) είναι ένας WT της μεταβατικής περιόδου του έτους, που εμφανίζεται σχεδόν όλους τους μήνες, εκτός από Ιούλιο και Αύγουστο, με ιδιαίτερα μεγάλη συχνότητα εμφάνισης τον Απρίλιο και τον Οκτώβριο. Βασικά χαρακτηριστικά του είναι οι αντικυκλωνικές συνθήκες στην περιοχή των Βαλκανίων με μέτριες προς υψηλές θερμοκρασίες, αρκετή ηλιοφάνεια με καθαρό ουρανό, δυτικούς ανέμους και μέτρια προς υψηλή σχετική υγρασία. Όπως είναι αναμενόμενο, λόγω της έντονης ηλιοφάνειας και της υψηλής θερμοκρασίας, υπάρχει αύξηση της συγκέντρωσης του O_3 (Σχήμα 3.1.14) τις μεσημεριανές κυρίως ώρες, καθώς η ηλιακή ακτινοβολία τις ώρες αυτές είναι εντονότερη. Παράλληλα, οι υπόλοιποι ρύποι εμφανίζουν μια αύξηση στη συγκέντρωσή τους τις πρώτες βραδινές ώρες και αυτό πιθανότατα οφείλεται στις αντικυκλωνικές συνθήκες που επικρατούν και ευθύνονται για τη συσσώρευση των εκπεμπόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων, αλλά και στους ασθενείς νότιους ανέμους, οι οποίοι εγκλωβίζουν τους ρύπους στο λεκανοπέδιο.
- **WT8:** Ο WT8 (Σχήμα 3.1.15) ανήκει στους χειμερινούς τύπους καιρού. Εμφανίζεται από Οκτώβριο ως Μάιο, με μέγιστα τους μήνες Απρίλιο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο. Οι άνεμοι που πνέουν στην Ήπειρο είναι νοτιοανατολικών διευθύνσεων. Οι θερμοκρασίες είναι σχετικά χαμηλές, με σχετικά αυξημένη συννεφιά και υψηλή σχετική υγρασία. Παρατηρείται (Σχήμα 3.1.16) μια αύξηση των συγκεντρώσεων των PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_4 , PM_{10} , CO και SO_2 τις βραδινές ώρες, αλλά και αύξηση των NO , NO_2 και NO_x τις πρωινές και πρώτες βραδινές ώρες. Οι ρύποι αυτοί ενισχύονται από τις χαμηλές θερμοκρασίες, λόγω της θέρμανσης των κτηρίων και των μετακινήσεων. Ταυτόχρονα, λόγω των νότιων ανέμων δεν επωφελείται η έντονη διασπορά των ρύπων. Ως προς το O_3 , και πάλι, εμφανίζει μια μικρή αύξηση τις μεσημεριανές ώρες λόγω της σχετικής αύξησης της ηλιακής ακτινοβολίας τις ώρες αυτές.
- **WT9:** Ο WT9 (Σχήμα 3.1.17) είναι ένας καθαρά χειμερινός WT. Εμφανίζεται από Δεκέμβριο έως Απρίλιο, με κύρια εμφάνιση Δεκέμβριο, Ιανουάριο και Φεβρουάριο. Χαρακτηρίζεται από την παρουσία ενός ισχυρού βαρομετρικού χαμηλού στην ανατολική Μεσόγειο, το οποίο συνδυάζεται με έναν αντικυκλώνα στην κεντρική Ευρώπη μεταφέροντας πολύ ψυχρές αέριες μάζες σε όλη τη ΝΑ Ευρώπη. Η σχετική υγρασία στην περιοχή της Ηπείρου είναι πολύ χαμηλή και ο καιρός είναι σχεδόν αίθριος. Πνέουν μέτριοι ΒΑ άνεμοι. Οι συγκεντρώσεις των ρύπων (Σχήμα 3.1.18) ακολουθούν πορεία, παρόμοια με τον WT8. Αυξάνονται σχετικά και πάλι οι συγκεντρώσεις τις πρώτες βραδινές ώρες λόγω των πολύ χαμηλών θερμοκρασιών, ωστόσο λόγω των ΒΑ ανέμων ενισχύεται η διασπορά των ρύπων.
- **WT10:** Ο WT10 (Σχήμα 3.1.19) είναι και αυτός ένας χειμερινός WT, που εμφανίζεται τους μήνες Σεπτέμβριο έως Μάιο, με κύρια εμφάνιση Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο. Χαρακτηρίζεται από αντικυκλωνικές συνθήκες στην περιοχή της Ηπείρου, χαμηλές θερμοκρασίες, ανέφελο ουρανό, ηλιοφάνεια και μέτρια προς χαμηλή σχετική υγρασία. Οι άνεμοι που επικρατούν είναι ασθενείς ΒΑ. Όπως και στον WT5, οι αντικυκλωνικές, συνθήκες είναι υπεύθυνες για την καθίζηση των αερίων μαζών και το σχηματισμό θερμοκρασιακών αναστροφών,

οι οποίες με την σειρά τους, είναι υπεύθυνες για τις κακές συνθήκες διασποράς και, κατά συνέπεια, για τη συσσώρευση των εκπεμπόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων κοντά στο έδαφος. Χαρακτηριστικά του WT10 είναι ο καθαρός ουρανός, και οι ιδιαίτερα χαμηλές θερμοκρασίες, κυρίως τη νύχτα και νωρίς το πρωί. Με τον τρόπο αυτό, ενισχύεται η συσσώρευση ατμοσφαιρικών ρύπων στα χαμηλά τροποσφαιρικά επίπεδα λόγω απουσίας οριζόντιας και κάθετης ανάμειξης, αλλά και παράλληλα, λόγω της εκτομής ρύπων που σχετίζονται με την καύση βιομάζας αλλά και εξαιτίας της θέρμανσης των σπιτιών. Έτσι, δικαιολογούνται και πάλι, οι υψηλές συγκεντρώσεις (Σχήμα 3.1.20) σχεδόν όλων των ρύπων τις πρώτες βραδινές ώρες, εκτός από το O₃, το οποίο εμφανίζει μια μικρή αύξηση τις μεσημεριανές ώρες, όπως συμβαίνει σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις.

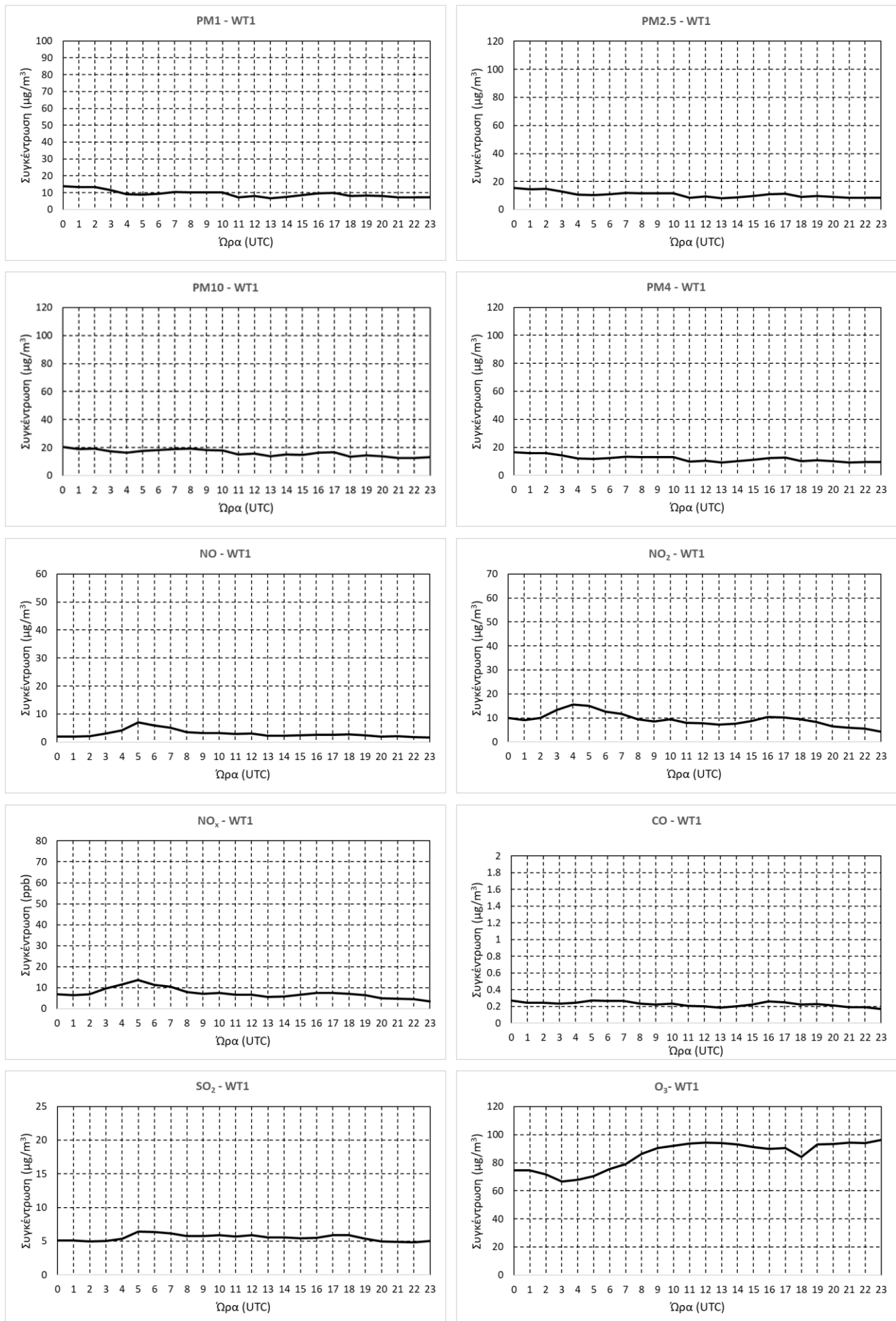
- **WT11:** Ο WT11 (Σχήμα 3.1.21) ανήκει στους τύπους καιρού των μεταβατικών εποχών. Εμφανίζεται σχεδόν όλον τον χρόνο, εκτός από τον Ιούνιο και Αύγουστο, και παρουσιάζει μέγιστη εμφάνιση τους μήνες Οκτώβριο, Νοέμβριο και Απρίλιο. Χαρακτηριστικά του είναι η ύπαρξη ενός ασθενούς βαρομετρικού χαμηλού στην κεντρική Μεσόγειο, το οποίο προκαλεί ασθενείς νοτίους ανέμους στην περιοχή της Ηπείρου, οι οποίοι προκαλούν πυκνή συννεφιά στα προσήνεμα. Η ενδοημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των ρύπων (Σχήμα 3.1.22) χαρακτηρίζεται από το βραδινό μέγιστο για τα PM το CO και το SO₂, το διπλό μέγιστο των οξειδίων του αζώτου (πρωί – βράδυ) και το μεσημεριανό ασθενές μέγιστο για το όζον.
- **WT12:** Ο WT12 (Σχήμα 3.1.23) είναι ένας τύπος καιρού της ψυχρής περιόδου του έτους, αφού και αυτός εμφανίζεται καθ' όλη την διάρκεια του έτους, εκτός από Ιούλιο και Αύγουστο, με έντονη εμφάνιση τους ανοιξιάτικους μήνες Μάρτιο, Απρίλιο και Μάιο. Χαρακτηρίζεται από έναν αυλώνα χαμηλών γεωδυναμικών υψών στα Βαλκάνια συνοδευόμενο από ένα βαρομετρικό χαμηλό στην επιφάνεια στη Μαύρη Θάλασσα. Στην περιοχή της Ηπείρου πνέουν ΒΔ άνεμοι και επικρατούν σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, και μέτρια νεφοκάλυψη. Οι συγκεντρώσεις των ρύπων (Σχήμα 3.1.24) ακολουθούν και πάλι πορεία παρόμοια με αυτές του WT11, με τη μόνη διαφορά ότι λόγω των ΒΔ ανέμων πιθανότατα, ενισχύεται η απομάκρυνση κάποιων ρύπων. Λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας, μόνο τις μεσημεριανές ώρες παρατηρείται αυξημένη συγκέντρωση του O₃.

Συνοψίζοντας, από τους 12 τύπους καιρού (WTs) που επικράτησαν την τριετή αυτή χρονική περίοδο στα Ιωάννινα, επαναλαμβάνουμε ότι οι 6 ανήκουν γενικά στην ψυχρή περίοδο του έτους (WT3, WT5, WT8, WT9, WT10, WT12), οι 2 WTs αντιστοιχούν στην θερμή περίοδο του έτους (WT2, WT6) και οι υπόλοιποι 4 στις μεταβατικές εποχές (WT1, WT4, WT7, WT11). Οι WT1 και WT4 περιλαμβάνουν μικρό σχετικά αριθμό ημερών και επομένως δεν εμφανίζονται πολύ συχνά. Αντίθετα, οι πιο συχνά εμφανιζόμενοι είναι WT2 και WT6, οι οποίοι περιέχουν μεγάλο αριθμό ημερών (179 και 199 ημέρες, αντίστοιχα). Από τα ιστογράμματα για τον κάθε μήνα (Σχήμα 3.1.25) παρατηρούμε ότι για τους τρεις πρώτους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο βασικοί τύποι καιρού είναι οι WT5 και WT10, τον Απρίλιο επικρατούν κυρίως οι WT7, WT11, WT12, για τους Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο, που συνιστούν ουσιαστικά τη θερινή περίοδο, οι δυο βασικοί τύποι καιρού είναι οι WT2 και WT6, για τον Οκτώβριο, όμοια με τον Απρίλιο, ο κύριος τύπος καιρού είναι ο WT7, για τον Νοέμβριο οι WT3 και WT11, και τέλος για τον Δεκέμβριο οι κύριοι τύποι είναι οι WT3 και WT5. Ως προς τους ρύπους (Σχήμα 3.1.26) παρατηρούμε ιδιαίτερα μεγάλες συγκεντρώσεις σχεδόν όλων των ρύπων στους WT5 και WT10. Συγκεκριμένα, για τα PM1, PM2.5, PM4, PM10, NO, NO₂, NO_x, CO και SO₂ οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις παρουσιάζονται στους WT5 και WT10, με το SO₂ να εμφανίζει μεγάλη συγκέντρωση και στον WT9. Τέλος, για το O₃ οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις εμφανίζονται στους WT1, WT2, WT4 και WT6, με τους WT1 και WT4 να μη δημιουργούν ασφαλή εικόνα, λόγω του μικρού αριθμού περιπτώσεων, που ανήκουν σε αυτούς.

WT1

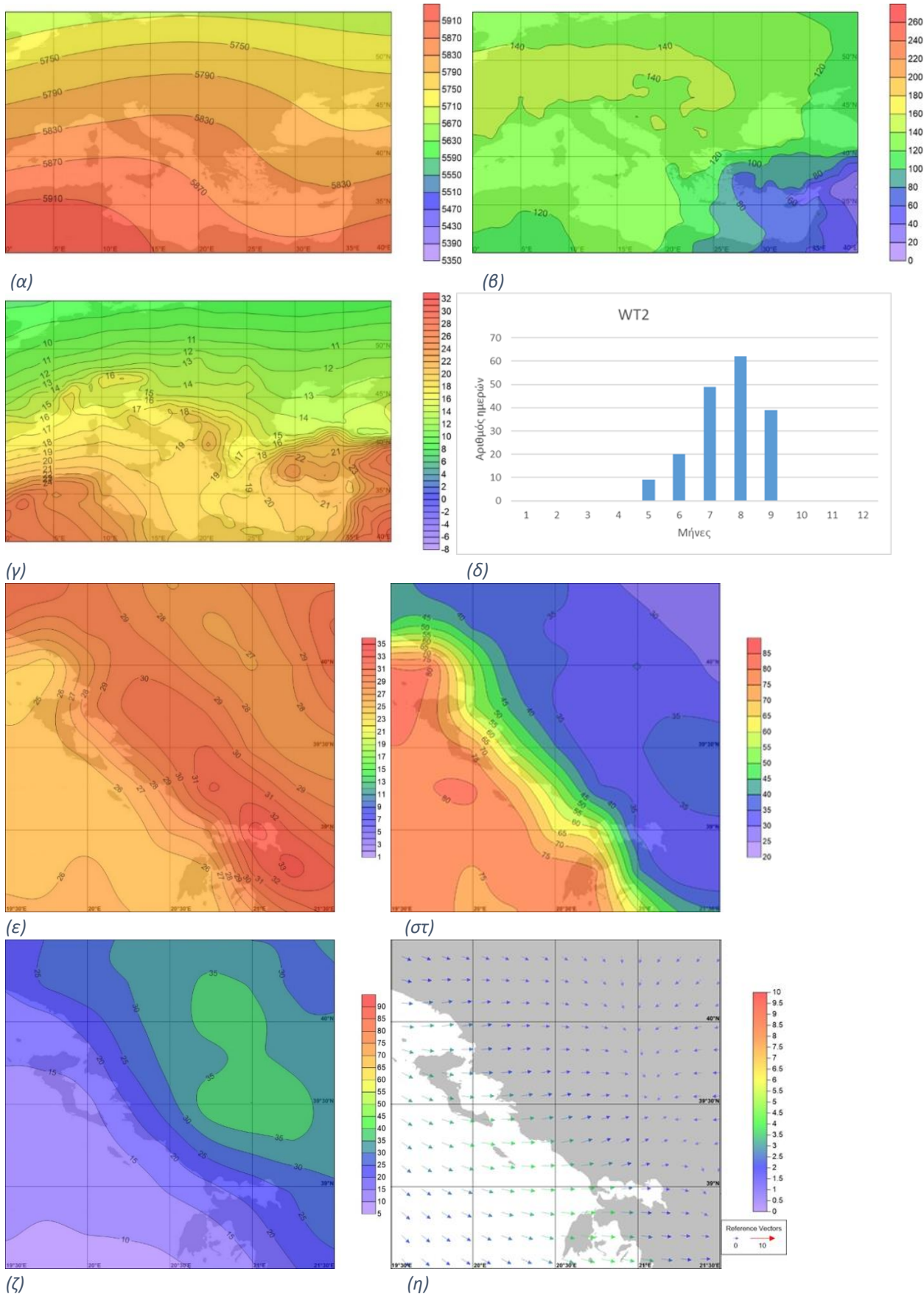


Σχήμα 3.1.1: WT1: Χάρτες χωρικής κατανομής των γεωδυναμικών υψών (gpm) στις ισοβαρικές επιφάνειες 500hPa (α) και 1000hPa (β) της θερμοκρασίας ($^{\circ}C$) στα 850hPa (γ) στην περιοχή της ΝΑ Ευρώπης, της θερμοκρασίας ($^{\circ}C$) στα 2 μέτρα (ε), της σχετικής υγρασίας (%) στα 2 μέτρα (στ), της ολικής νέφωσης (%) (ζ) και των διανυσμάτων του ανέμου (ταχύτητα σε m/s) (η) στην περιοχή της Ηπείρου. Επίσης εμφανίζεται η μηνιαία κατανομή του αριθμού ημερών (δ).

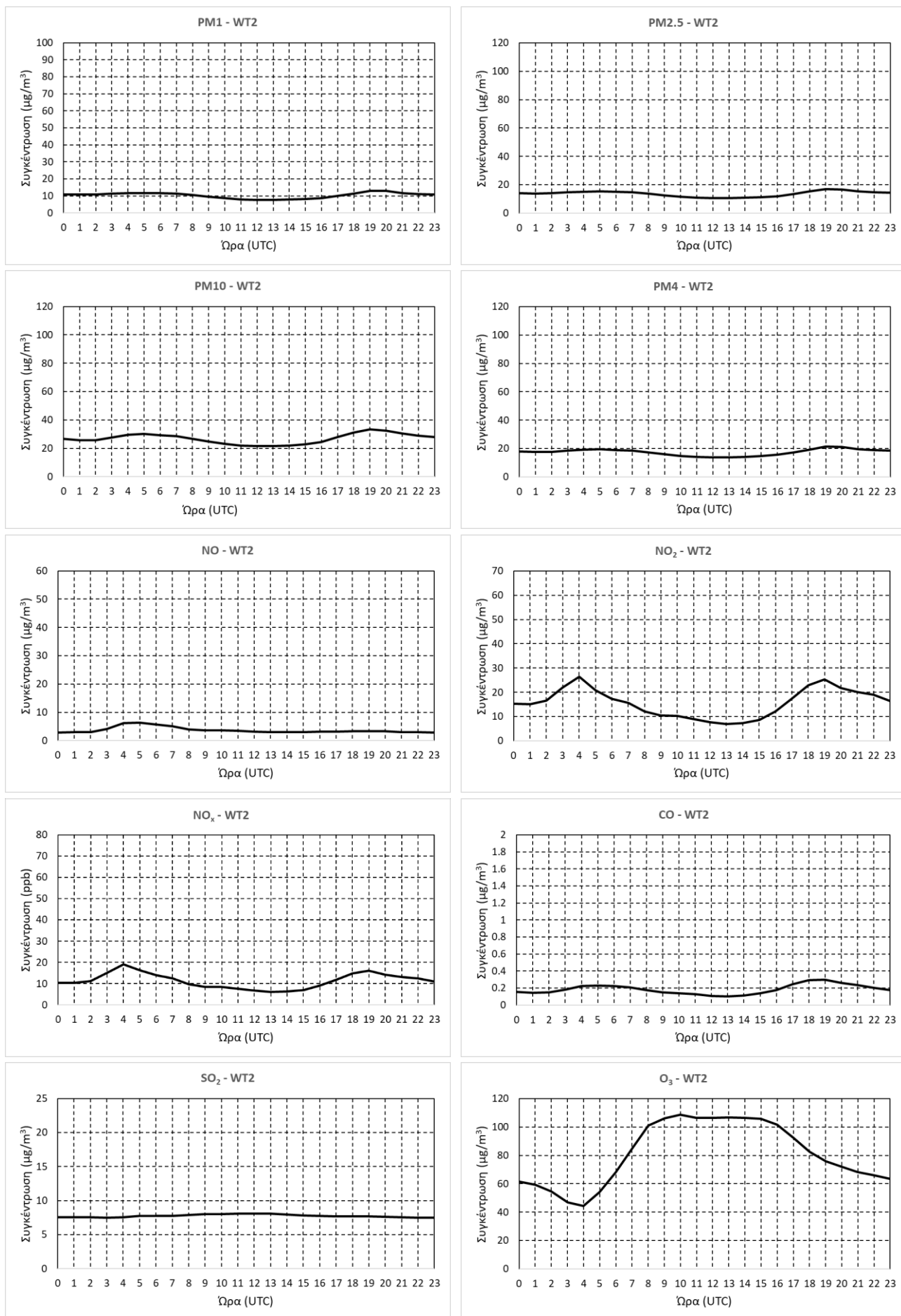


Σχήμα 3.1.2 : WT1: Η μέση ενδοημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης των ρύπων.

WT2

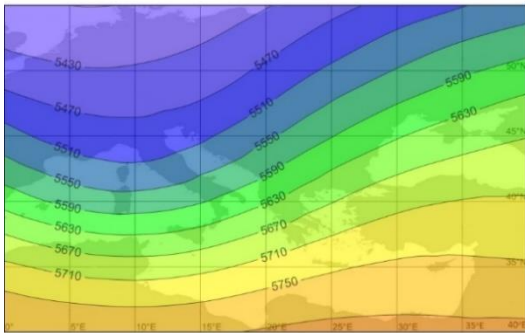


Σχήμα 3.1.3: WT2: Χάρτες χωρικής κατανομής των γεωδυναμικών υψών (gpm) στις ισοβαρικές επιφάνειες 500hPa (α) και 1000hPa (β) της θερμοκρασίας (°C) στα 850hPa (γ) στην περιοχή της ΝΑ Ευρώπης, της θερμοκρασίας (°C) στα 2 μέτρα (ε), της σχετικής υγρασίας (%) στα 2 μέτρα (σ), της ολικής νέφωσης (%) (ζ) και των διανυσμάτων του ανέμου (ταχύτητα σε m/s) (η) στην περιοχή της Ηπείρου. Επίσης εμφανίζεται η μηνιαία κατανομή του αριθμού ημερών (δ).

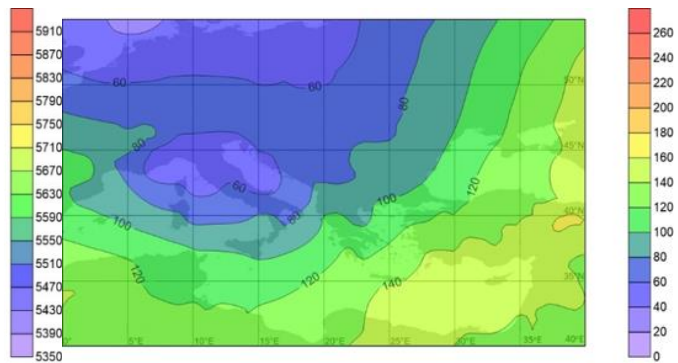


Σχήμα 3.1.4: WT2: Η μέση ενδοημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης των ρύπων.

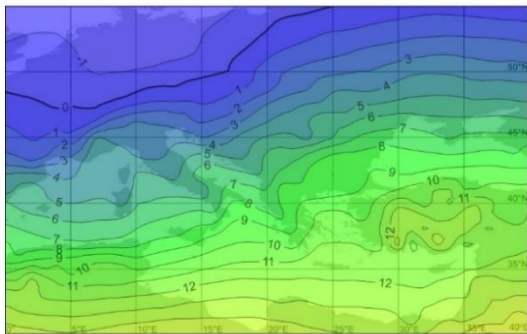
WT3



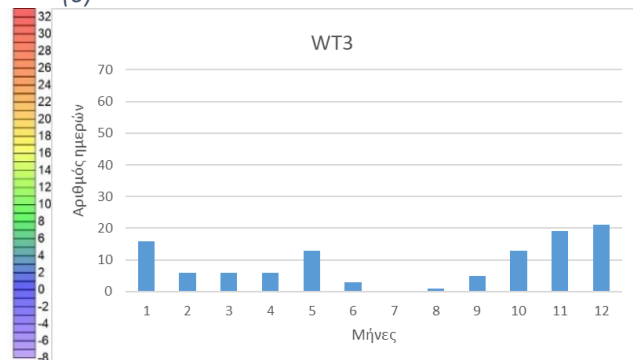
(α)



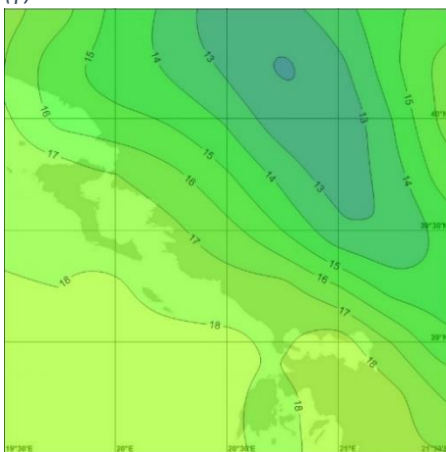
(β)



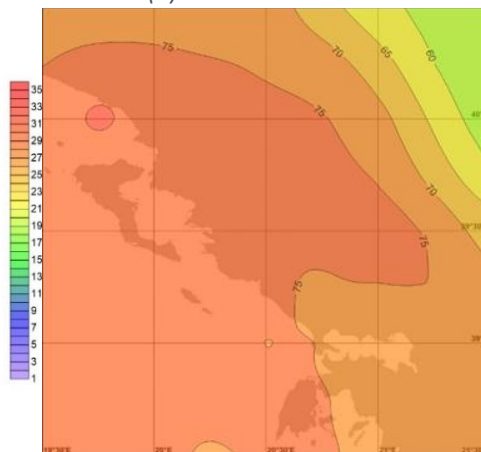
(γ)



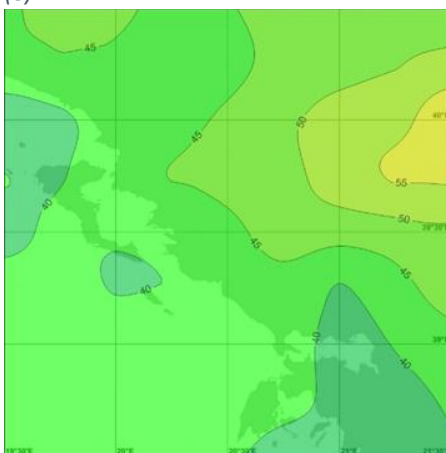
(δ)



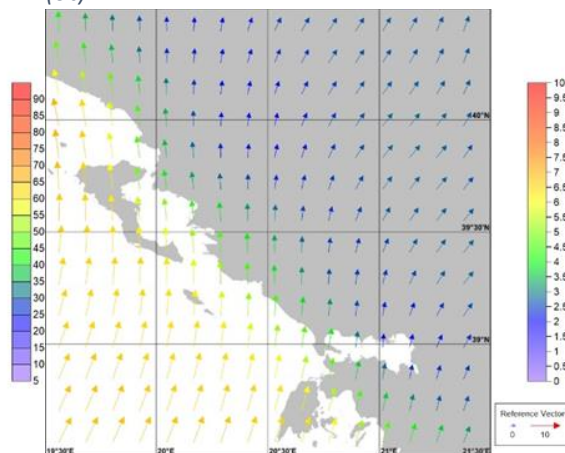
(ε)



(στ)

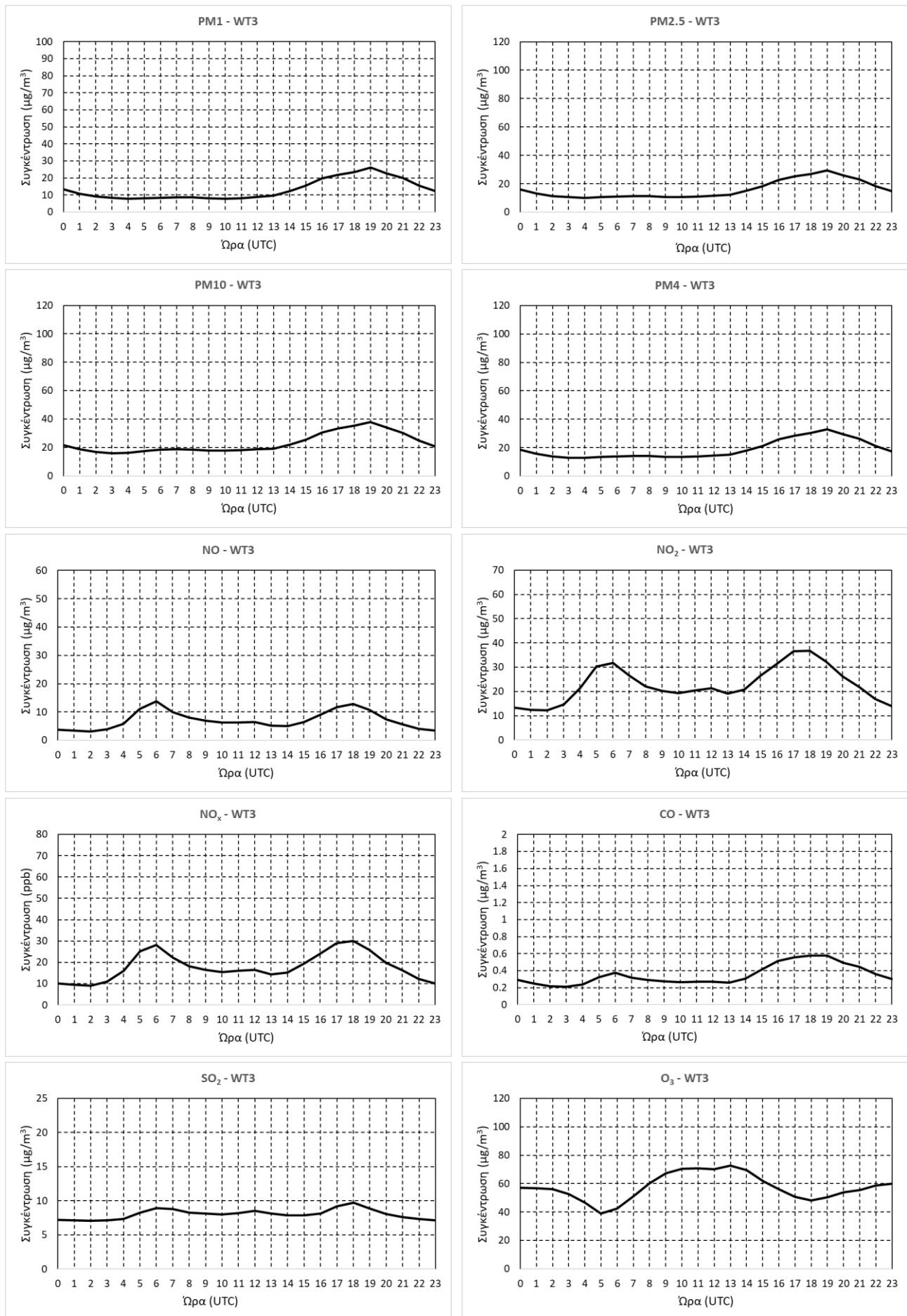


(ζ)



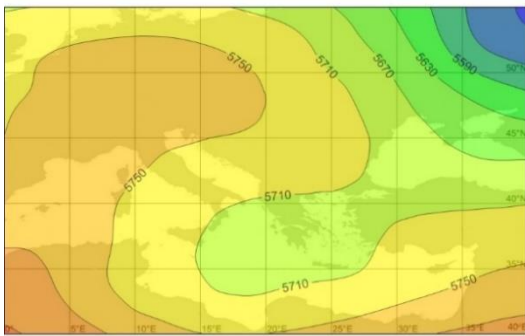
(η)

Σχήμα 1.3.5: WT3: Χάρτες χωρικής κατανομής των γεωδυναμικών υψών (gpm) στις ισοβαρικές επιφάνειες 500hPa (α) και 1000hPa (β) της θερμοκρασίας (°C) στα 850hPa (γ) στην περιοχή της ΝΑ Ευρώπης, της θερμοκρασίας (°C) στα 2 μέτρα (ε), της σχετικής υγρασίας (%) στα 2 μέτρα (στ), της ολικής νέφωσης (%) (ζ) και των διανυσμάτων του ανέμου (ταχύτητα σε m/s) (η) στην περιοχή της Ηπείρου. Επίσης εμφανίζεται η μηνιαία κατανομή του αριθμού ημερών (δ).

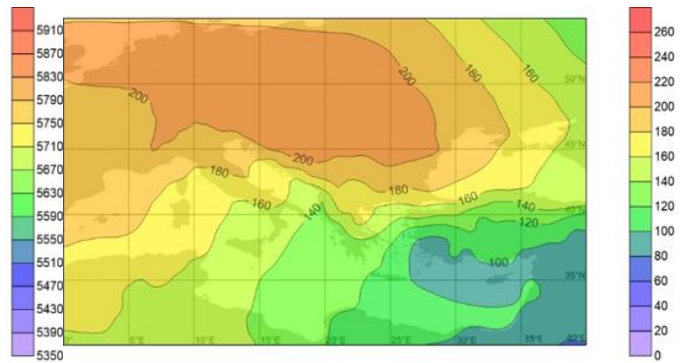


Σχήμα 3.1.6: WT3: Η μέση ενδοημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης των ρύπων.

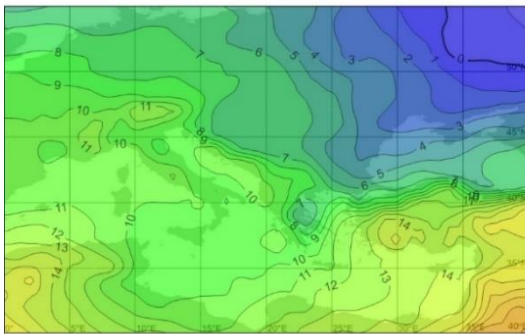
WT4



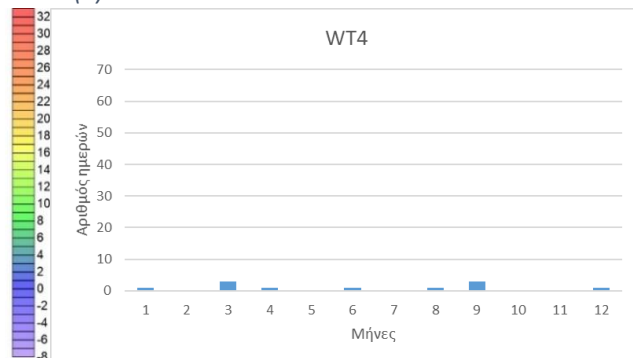
(α)



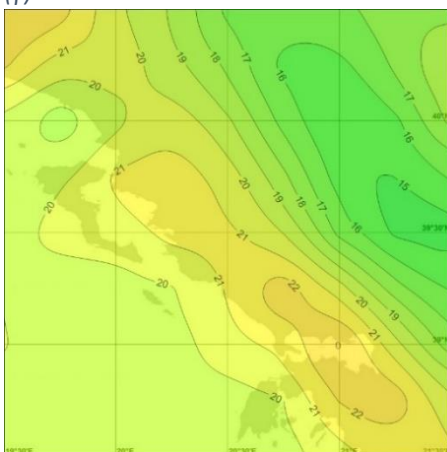
(β)



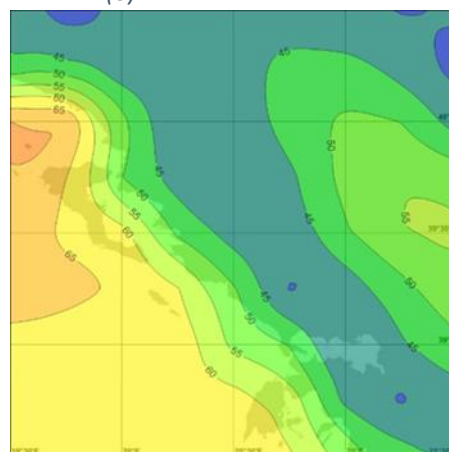
(γ)



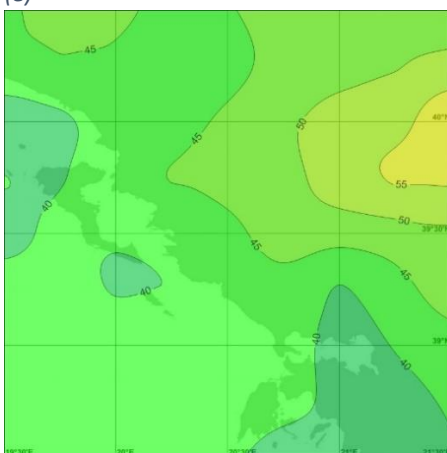
(δ)



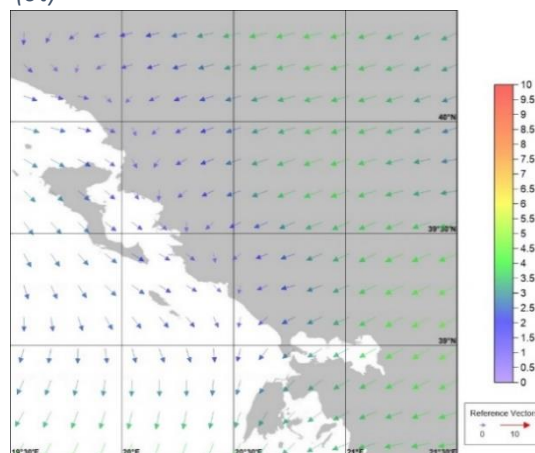
(ε)



(ςτ)

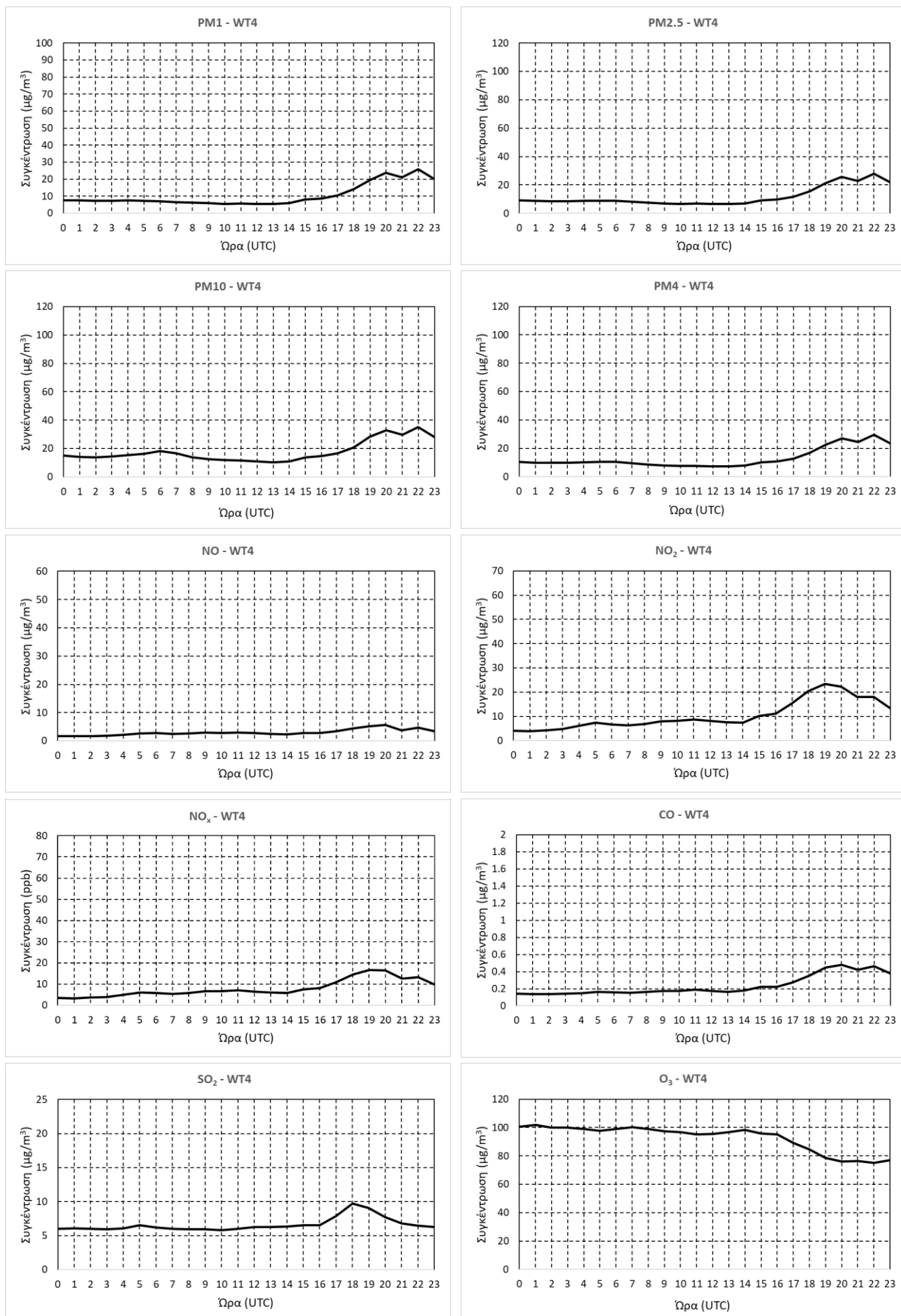


(ζ)



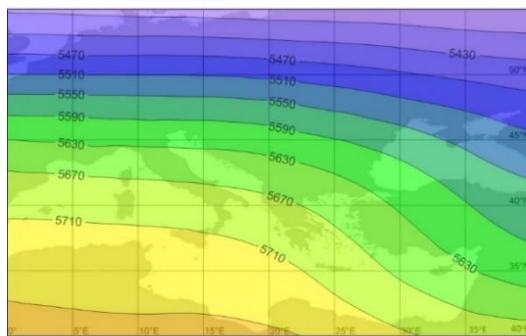
(η)

Σχήμα 3.1.7 : WT4: Χάρτες χωρικής κατανομής των γεωδυναμικών υψών (gpm) στις ισοβαρικές επιφάνειες 500hPa (α) και 1000hPa (β) της θερμοκρασίας (°C) στα 850hPa (γ) στην περιοχή της ΝΑ Ευρώπης, της θερμοκρασίας (°C) στα 2 μέτρα (ε), της σχετικής υγρασίας (%) στα 2 μέτρα (ςτ), της ολικής νέφωσης (%) (ζ) και των διανυσμάτων του ανέμου (ταχύτητα σε m/s) (η) στην περιοχή της Ηπείρου. Επίσης εμφανίζεται η μηνιαία κατανομή του αριθμού ημερών (δ).

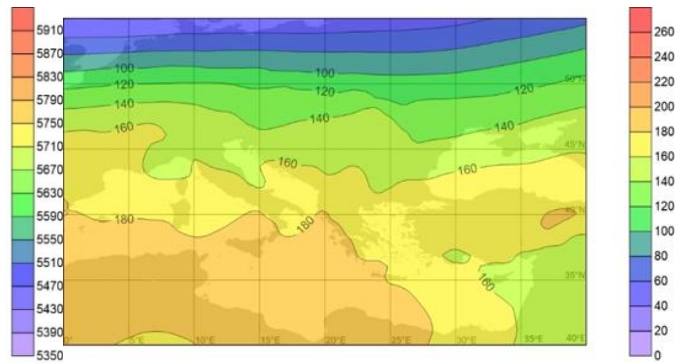


Σχήμα 3.1.8: WT4: Η μέση ενδοημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης των ρύπων.

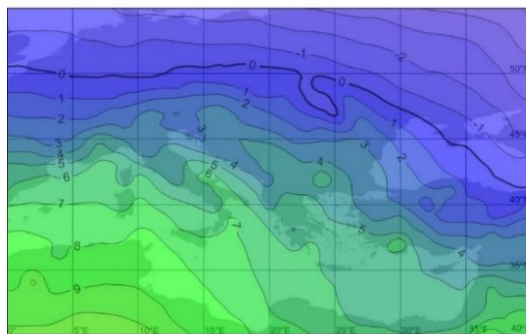
WT5



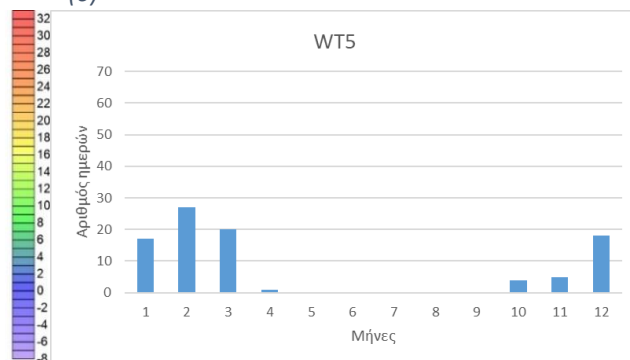
(α)



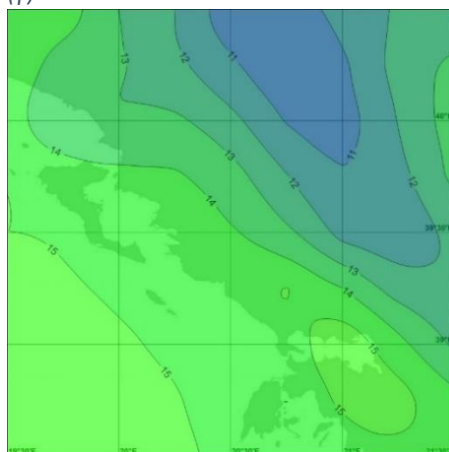
(β)



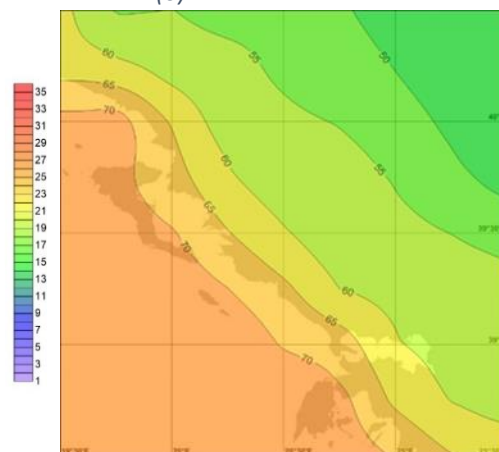
(γ)



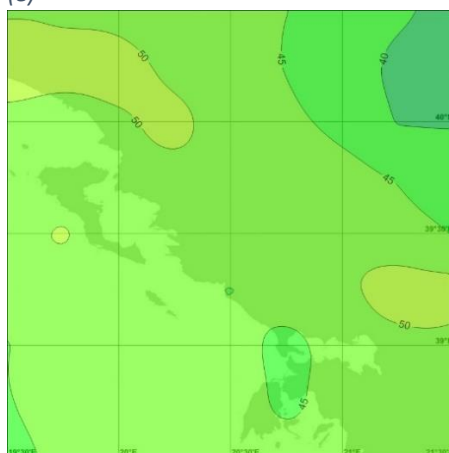
(δ)



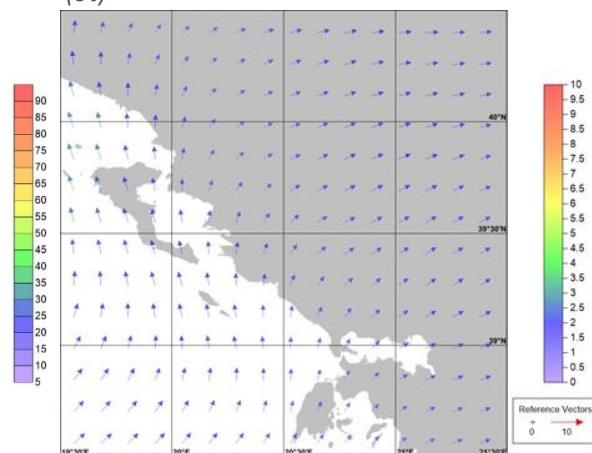
(ε)



(ςτ)

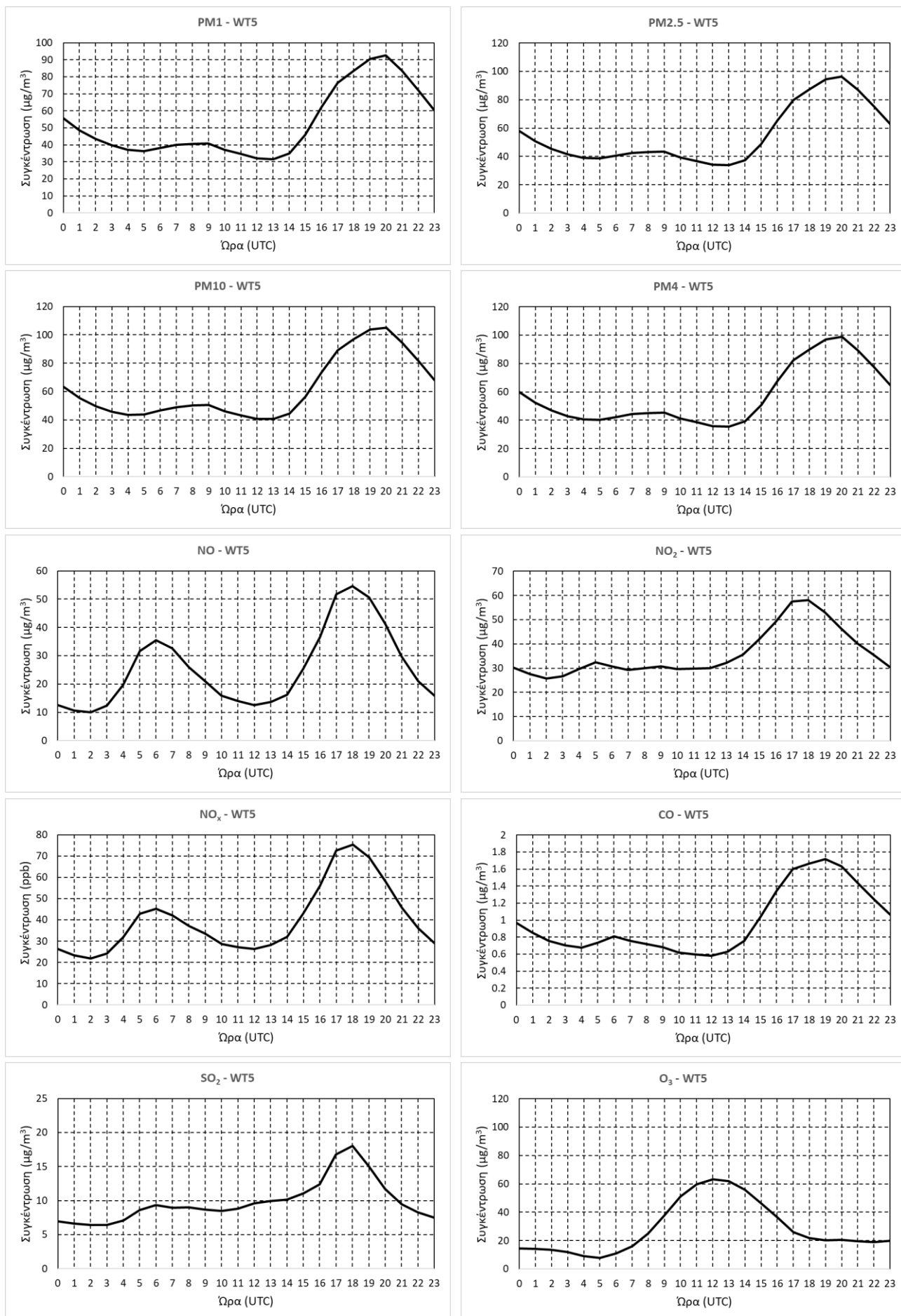


(ζ)



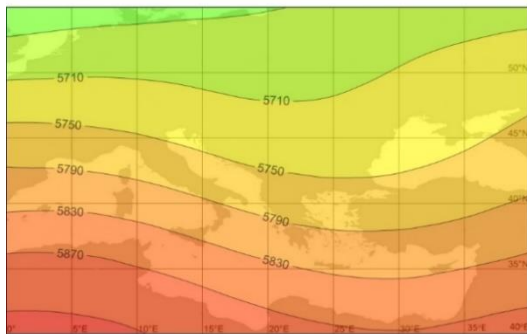
(η)

Σχήμα 3.1.9 : WT5: Χάρτες χωρικής κατανομής των γεωδυναμικών υψών (gpm) στις ισοβαρικές επιφάνειες 500hPa (α) και 1000hPa (β) της θερμοκρασίας (°C) στα 850hPa (γ) στην περιοχή της ΝΑ Ευρώπης, της θερμοκρασίας (°C) στα 2 μέτρα (ε), της σχετικής υγρασίας (%) στα 2 μέτρα (ςτ), της ολικής νέφωσης (%) (ζ) και των διανυσμάτων του ανέμου (ταχύτητα σε m/s) (η) στην περιοχή της Ηπείρου. Επίσης εμφανίζεται η μηνιαία κατανομή του αριθμού ημερών (δ).

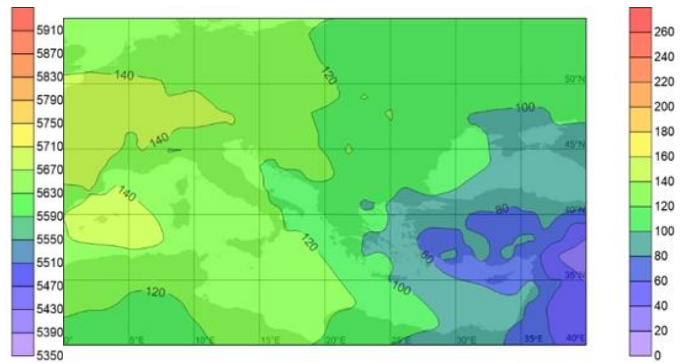


Σχήμα 3.1.10: WT5: Η μέση ενδοημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης των ρύπων.

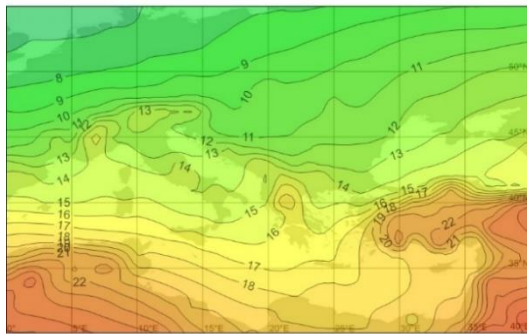
WT6



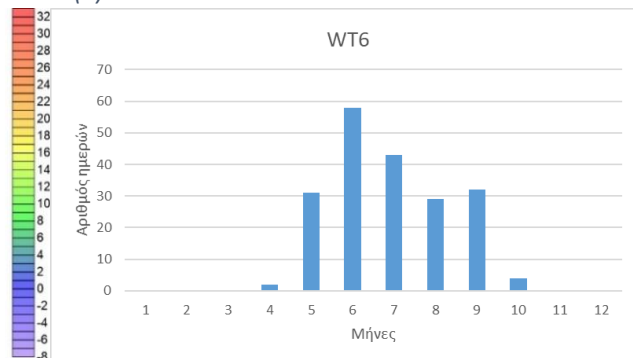
(α)



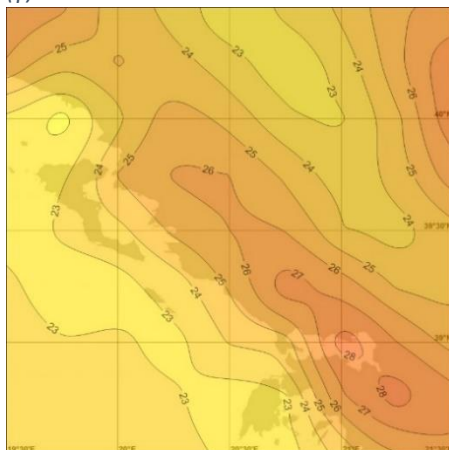
(β)



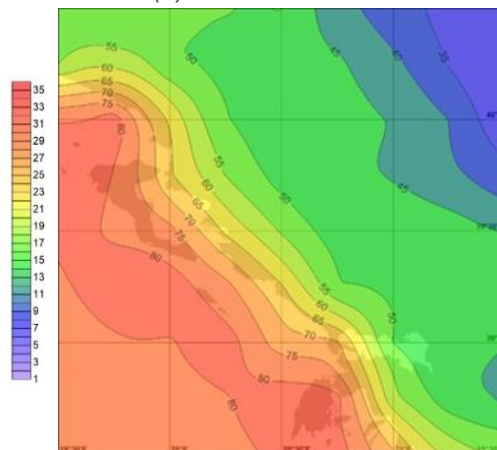
(γ)



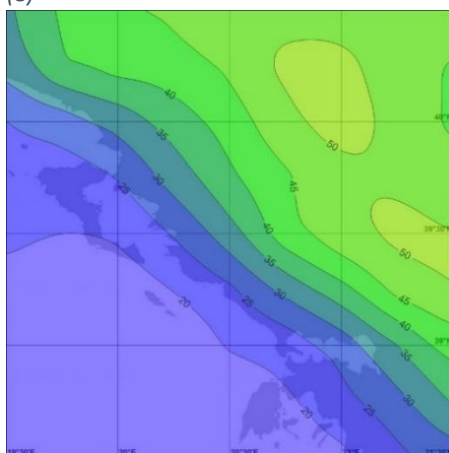
(δ)



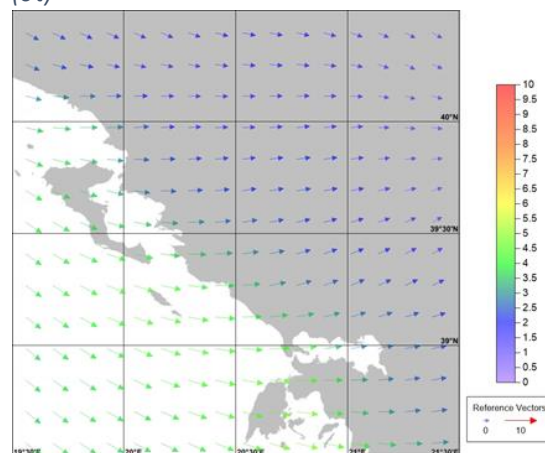
(ε)



(ς)

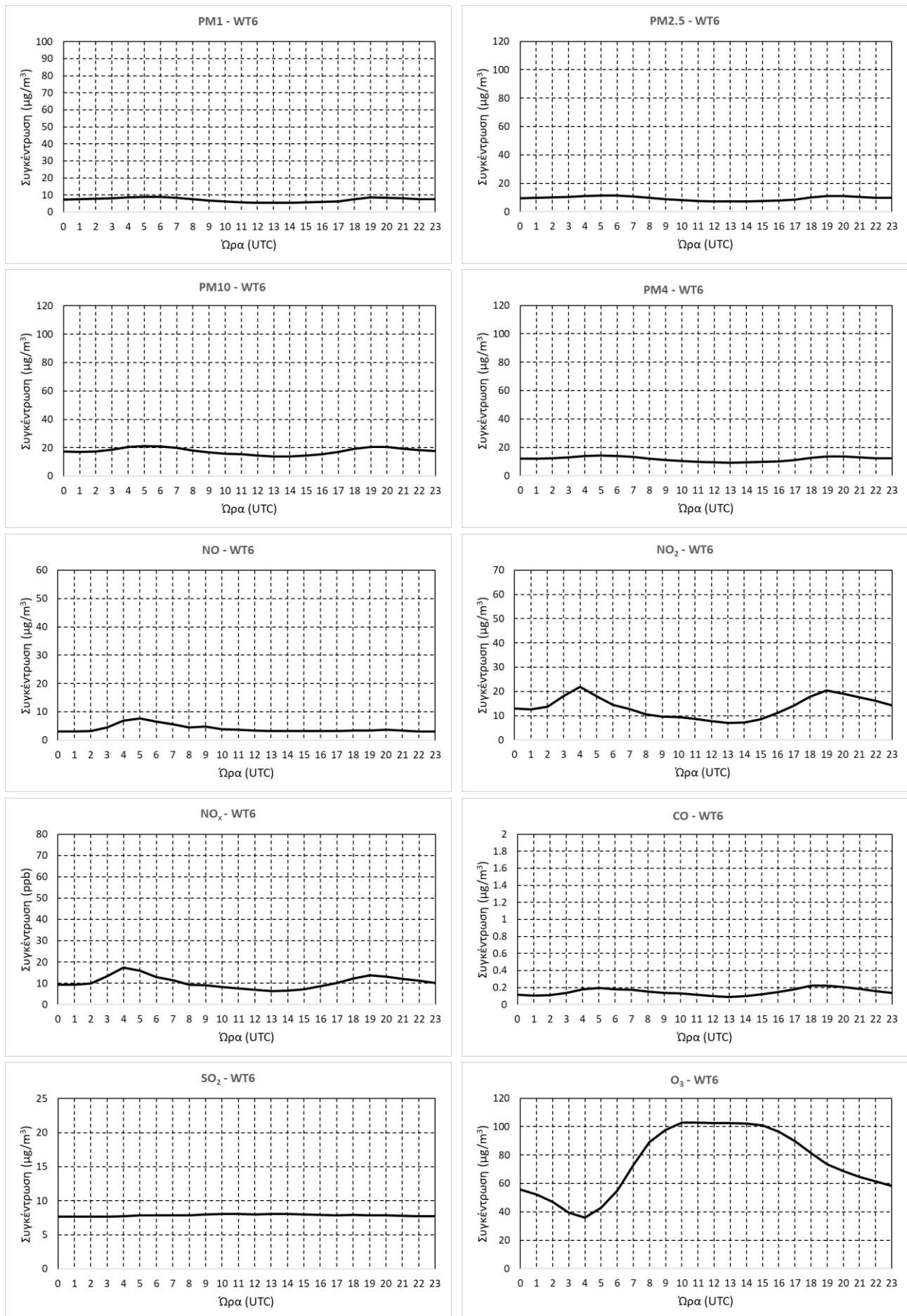


(ζ)



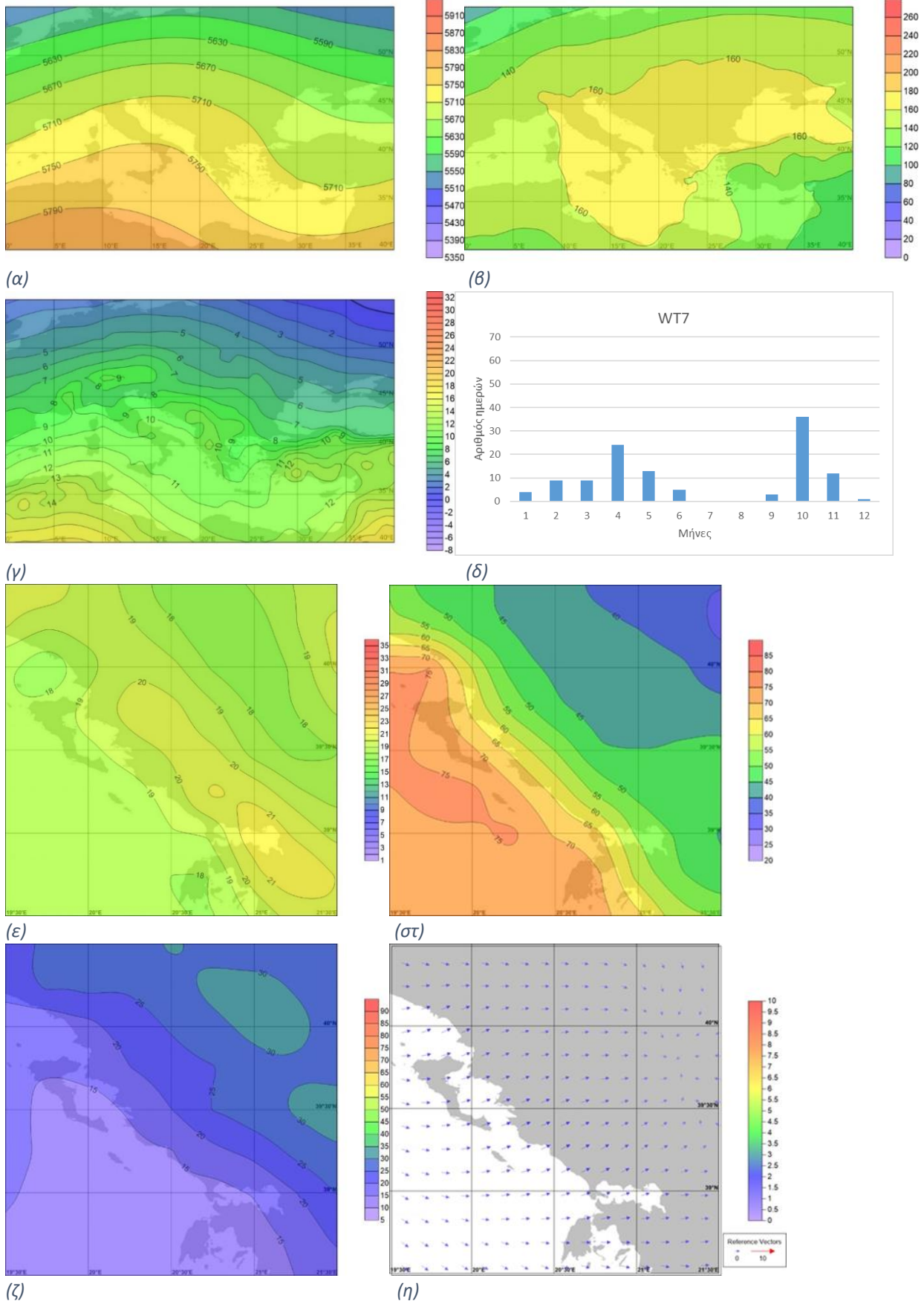
(η)

Σχήμα 3.1.11: WT6: Χάρτες χωρικής κατανομής των γεωδυναμικών υψών (gpm) στις ισοβαρικές επιφάνειες 500hPa (α) και 1000hPa (β) της θερμοκρασίας (°C) στα 850hPa (γ) στην περιοχή της ΝΑ Ευρώπης, της θερμοκρασίας (°C) στα 2 μέτρα (ε), της σχετικής υγρασίας (%) στα 2 μέτρα (ς), της ολικής νέφωσης (%) (ζ) και των διανυσμάτων του ανέμου (ταχύτητα σε m/s) (η) στην περιοχή της Ηπείρου. Επίσης εμφανίζεται η μηνιαία κατανομή του αριθμού ημερών (δ).

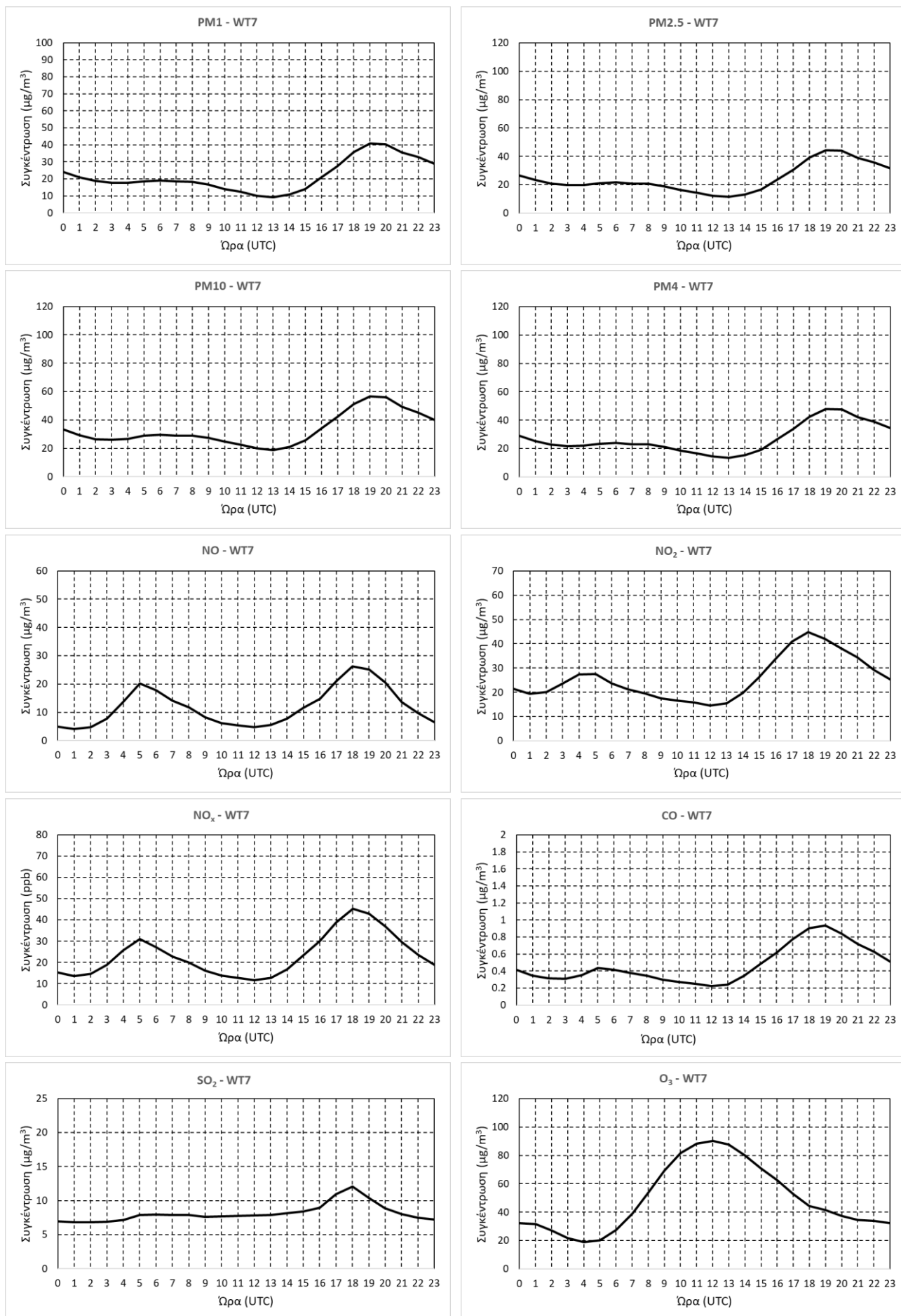


Σχήμα 3.1.12: WT6: Η μέση ενδοημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης των ρύπων.

WT7

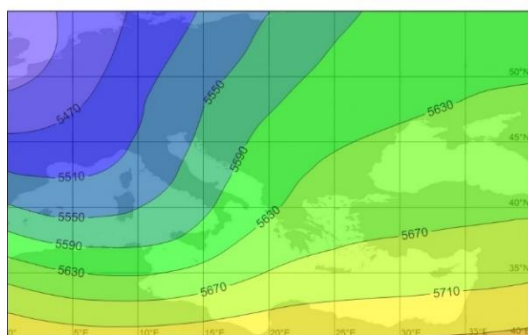


Σχήμα 3.1.13: WT7: Χάρτες χωρικής κατανομής των γεωδυναμικών υψών (gpm) στις ισοβαρικές επιφάνειες 500hPa (α) και 1000hPa (β) της θερμοκρασίας (°C) στα 850hPa (γ) στην περιοχή της ΝΑ Ευρώπης, της θερμοκρασίας (°C) στα 2 μέτρα (ε), της σχετικής υγρασίας (%) στα 2 μέτρα (σ), της ολικής νέφωσης (%) (ζ) και των διανυσμάτων του ανέμου (ταχύτητα σε m/s) (η) στην περιοχή της Ηπείρου. Επίσης εμφανίζεται η μηνιαία κατανομή του αριθμού ημερών (δ).

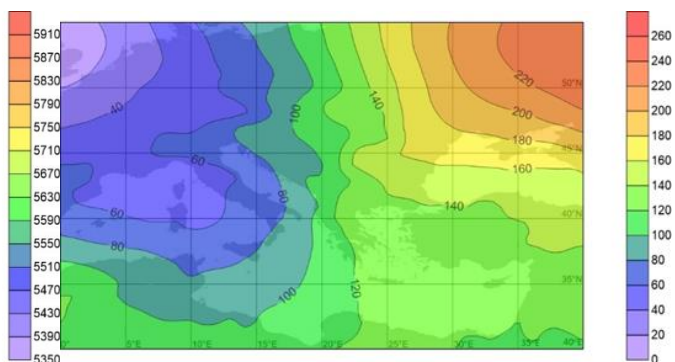


Σχήμα 3.1.14: WT7: Η μέση ενδοημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης των ρύπων.

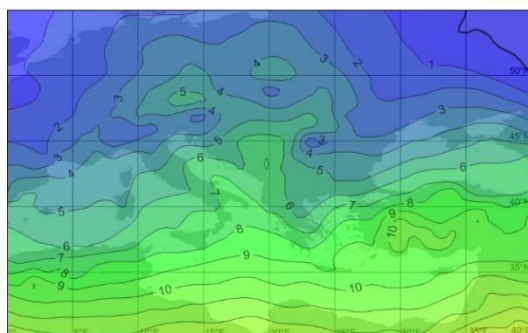
WT8



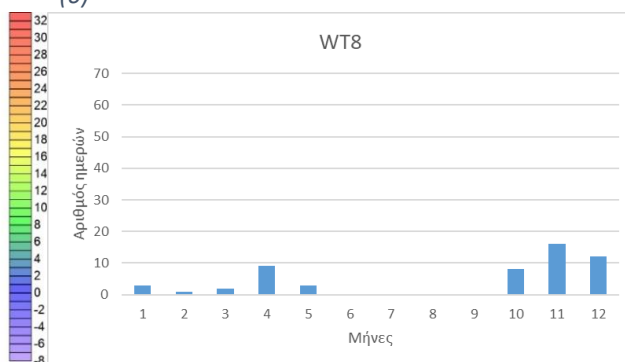
(α)



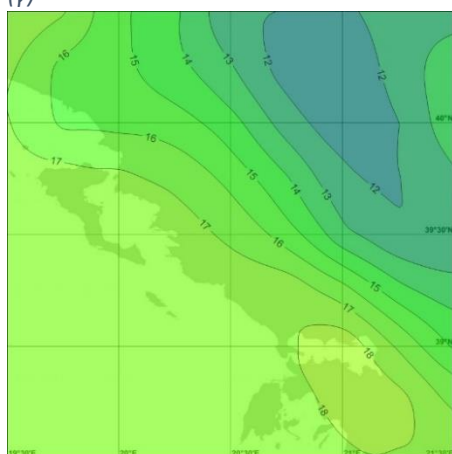
(β)



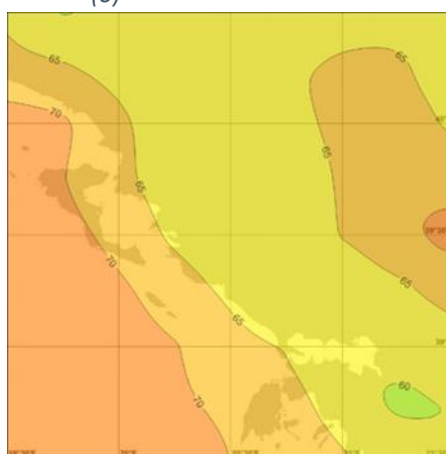
(γ)



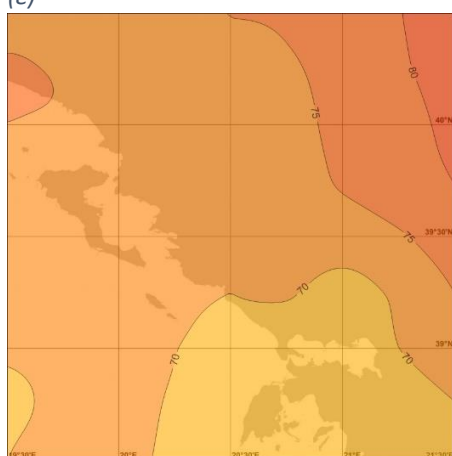
(δ)



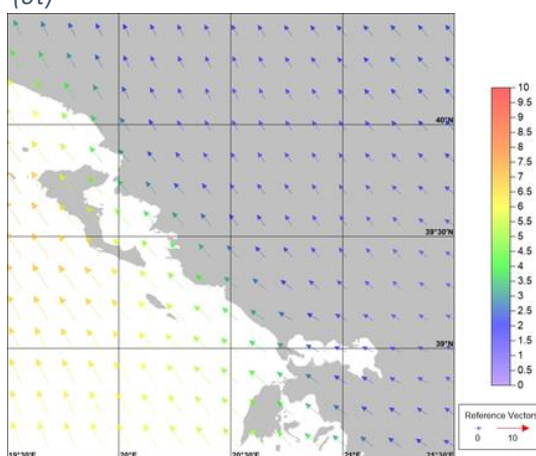
(ε)



(ςτ)

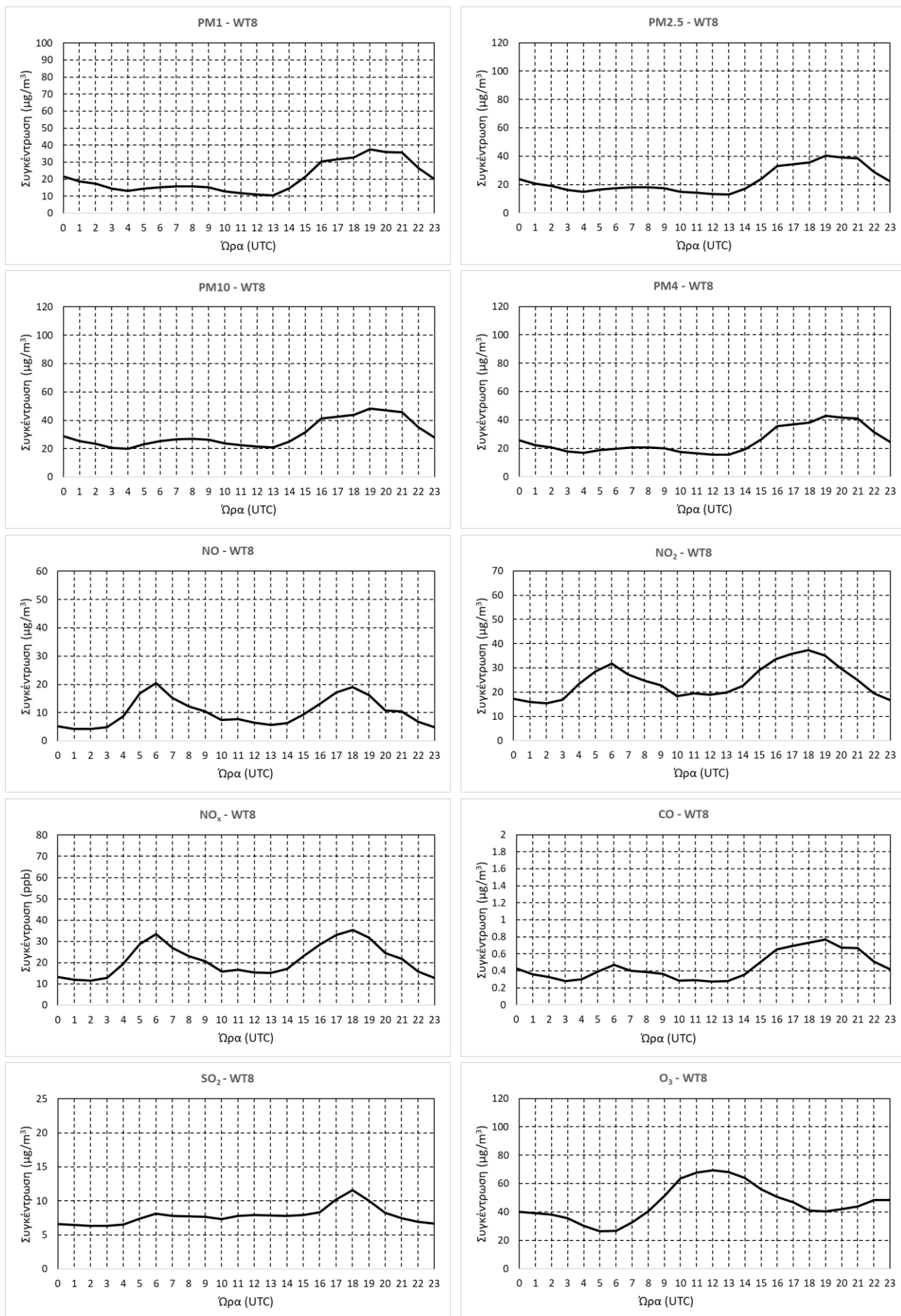


(ζ)



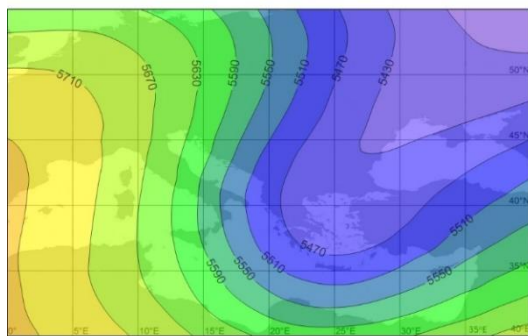
(η)

Σχήμα 3.1.15: WT8: Χάρτες χωρικής κατανομής των γεωδυναμικών υψών (gpm) στις ισοβαρικές επιφάνειες 500hPa (α) και 1000hPa (β) της θερμοκρασίας ($^{\circ}C$) στα 850hPa (γ) στην περιοχή της ΝΑ Ευρώπης, της θερμοκρασίας ($^{\circ}C$) στα 2 μέτρα (ε), της σχετικής υγρασίας (%) στα 2 μέτρα (ςτ), της ολικής νέφωσης (%) (ζ) και των διανυσμάτων του ανέμου (ταχύτητα σε m/s) (η) στην περιοχή της Ηπείρου. Επίσης εμφανίζεται η μηνιαία κατανομή του αριθμού ημερών (δ).

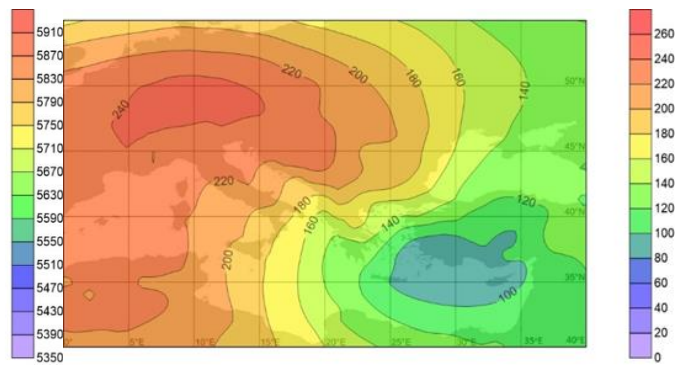


Σχήμα 3.1.16: WT8: Η μέση ενδοημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης των ρύπων.

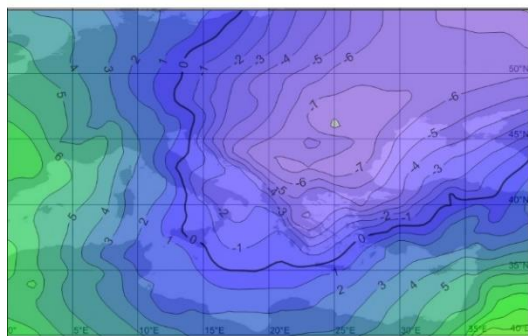
WT9



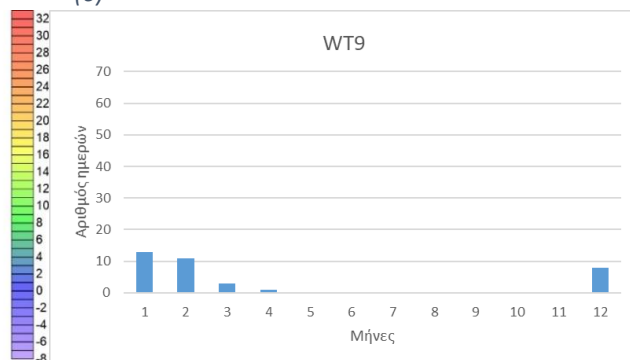
(α)



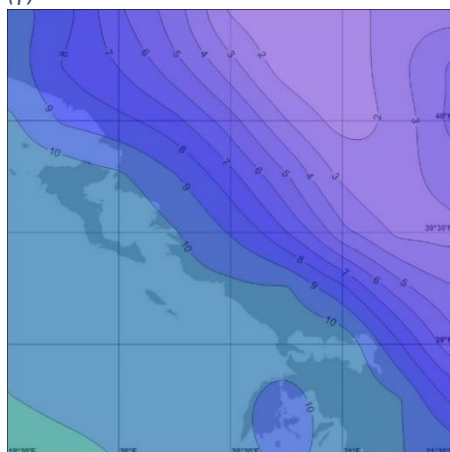
(β)



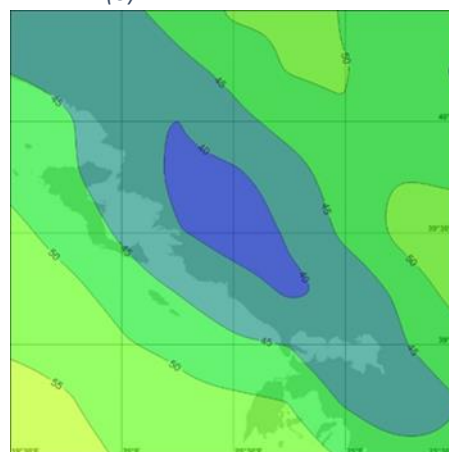
(γ)



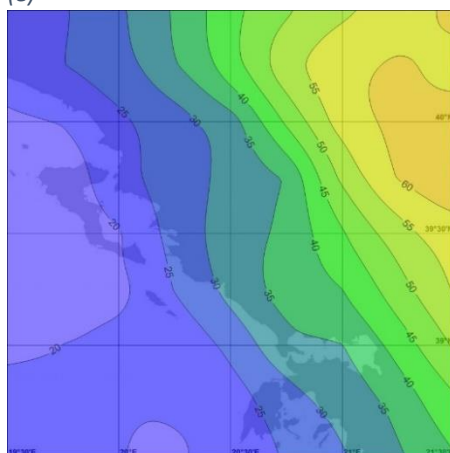
(δ)



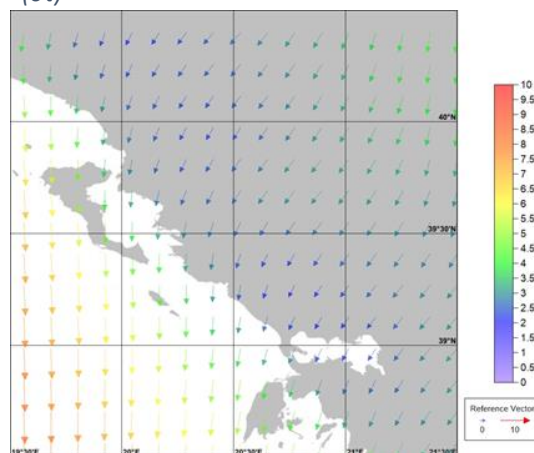
(ε)



(ς)

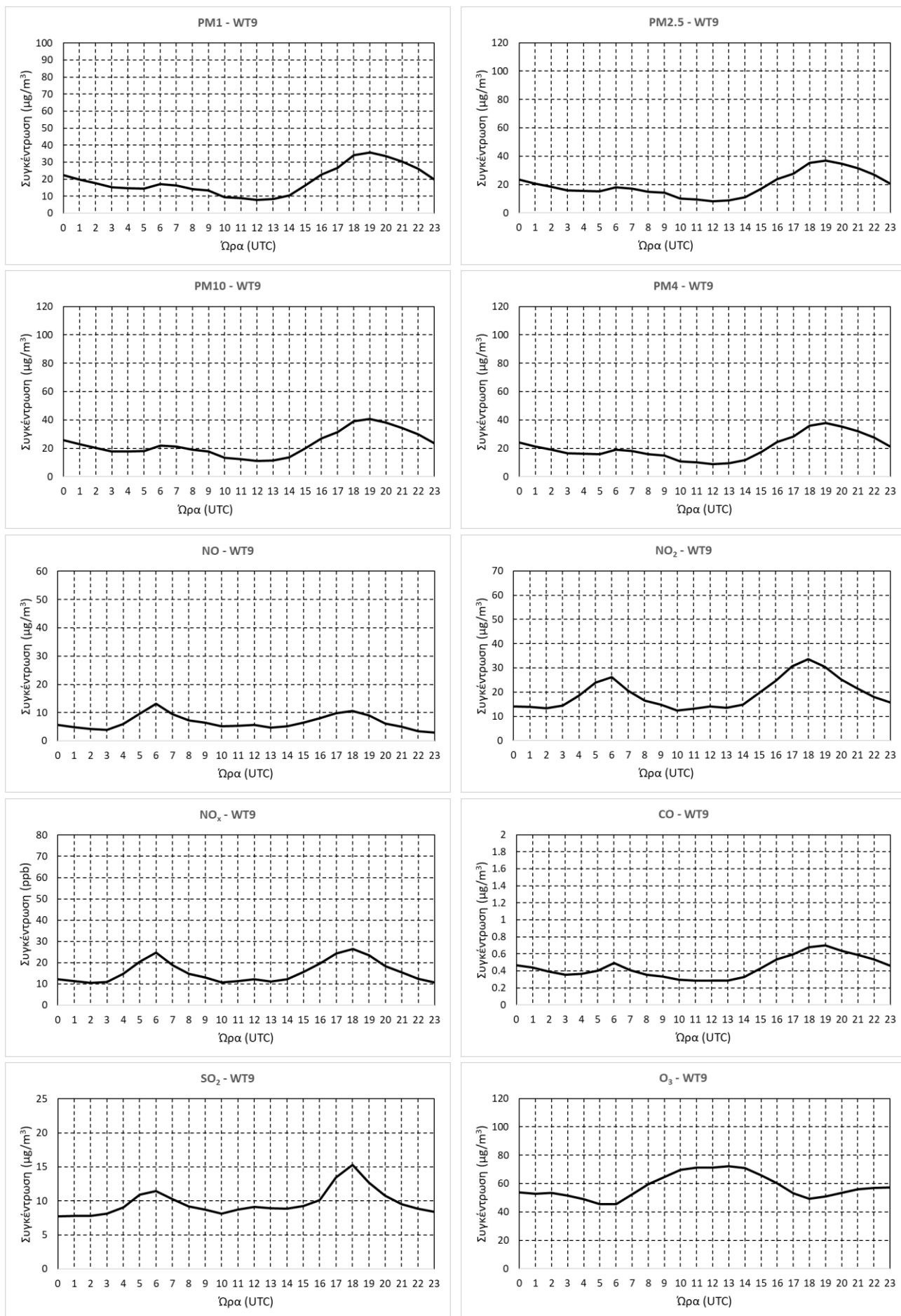


(ζ)



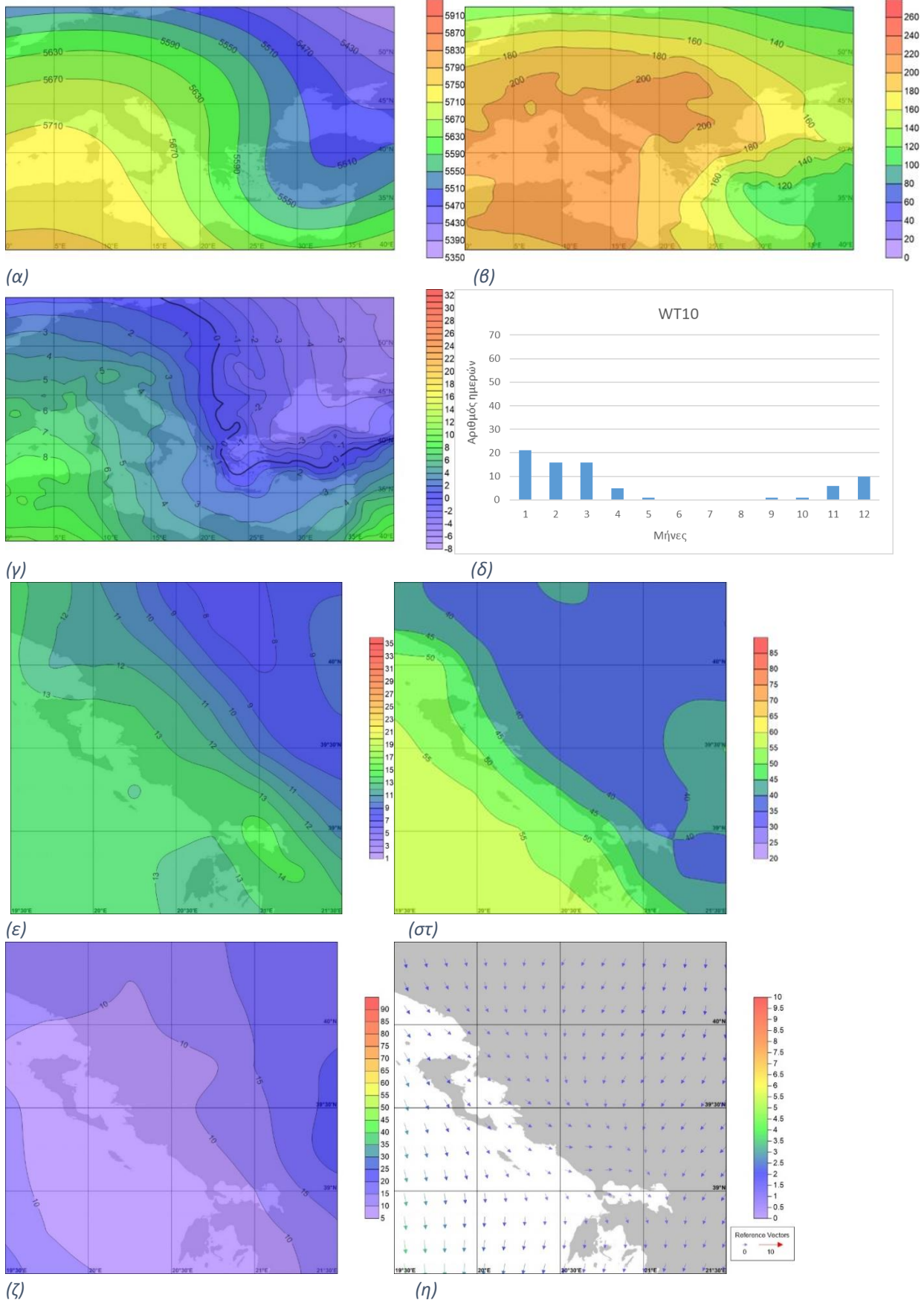
(η)

Σχήμα 3.1.17: WT9: Χάρτες χωρικής κατανομής των γεωδυναμικών υψών (gpm) στις ισοβαρικές επιφάνειες 500hPa (α) και 1000hPa (β) της θερμοκρασίας (°C) στα 850hPa (γ) στην περιοχή της ΝΑ Ευρώπης, της θερμοκρασίας (°C) στα 2 μέτρα (ε), της σχετικής υγρασίας (%) στα 2 μέτρα (ς), της ολικής νέφωσης (%) (ζ) και των διανυσμάτων του ανέμου (ταχύτητα σε m/s) (η) στην περιοχή της Ηπείρου. Επίσης εμφανίζεται η μηνιαία κατανομή του αριθμού ημερών (δ).

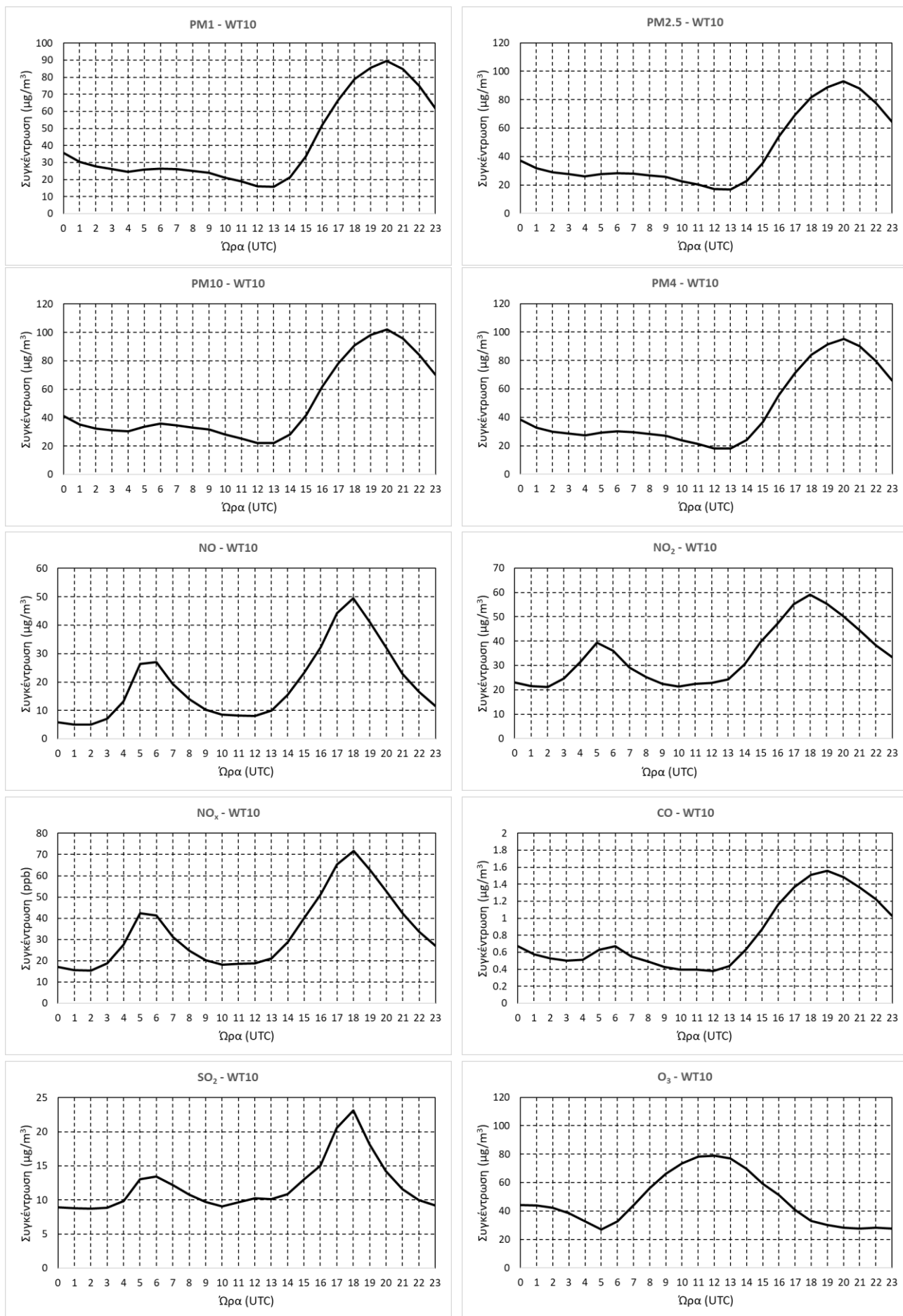


Σχήμα 3.1.18: WT9: Η μέση ενδοημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης των ρύπων.

WT10

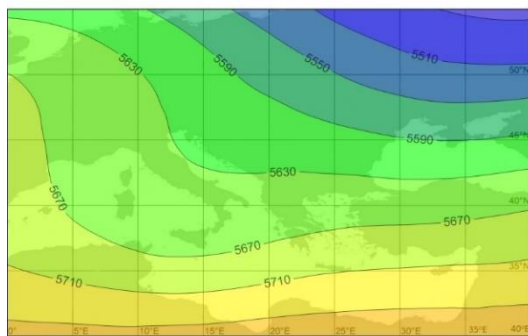


Σχήμα 3.1.19: WT10: Χάρτες χωρικής κατανομής των γεωδυναμικών υψών (gpm) στις ισοβαρικές επιφάνειες 500hPa (α) και 1000hPa (β) της θερμοκρασίας (°C) στα 850hPa (γ) στην περιοχή της ΝΑ Ευρώπης, της θερμοκρασίας (°C) στα 2 μέτρα (ε), της σχετικής υγρασίας (%) στα 2 μέτρα (σ), της ολικής νέφωσης (%) (ζ) και των διανυσμάτων του ανέμου (ταχύτητα σε m/s) (η) στην περιοχή της Ηπείρου. Επίσης εμφανίζεται η μηνιαία κατανομή του αριθμού ημερών (δ).

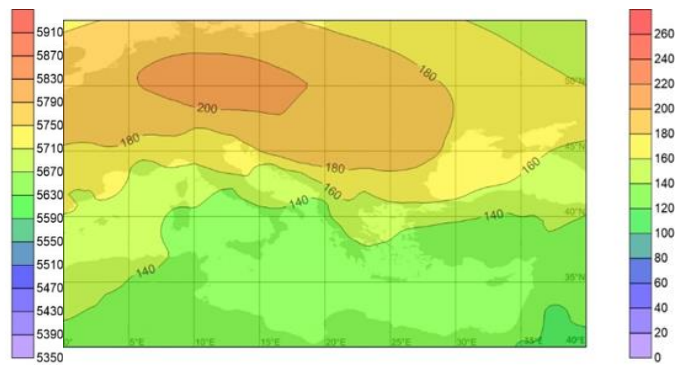


Σχήμα 3.1.20: WT10: Η μέση ενδοημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης των ρύπων.

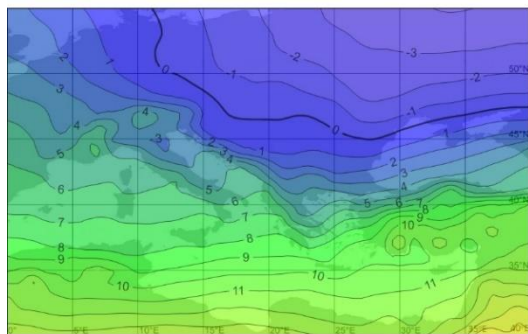
WT11



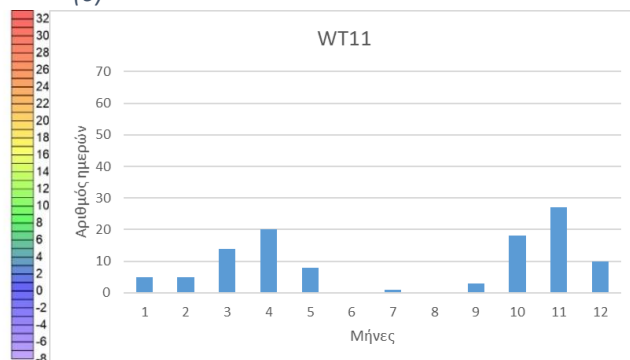
(α)



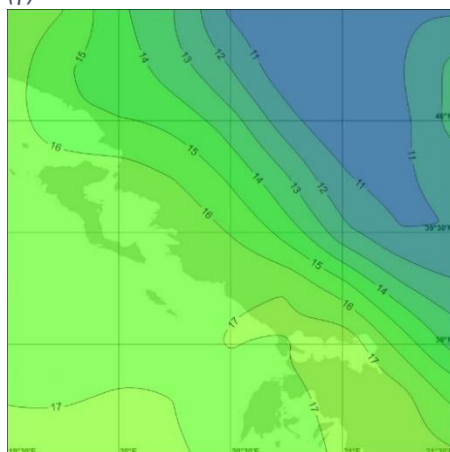
(β)



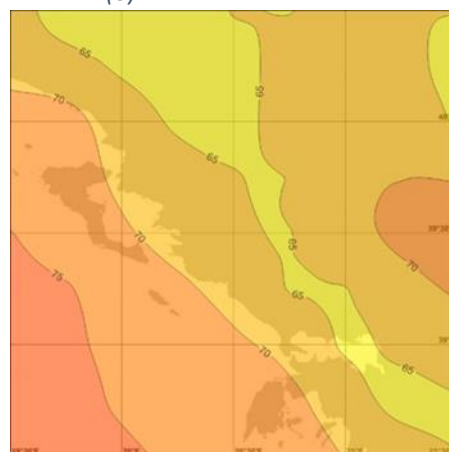
(γ)



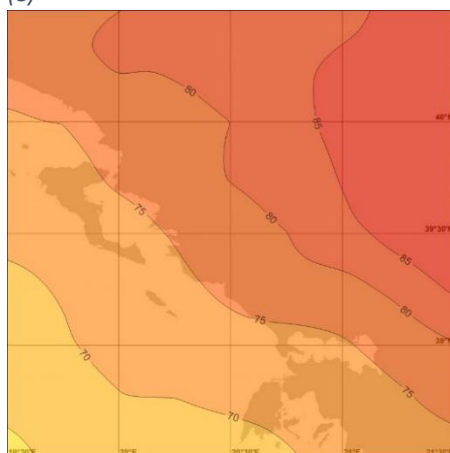
(δ)



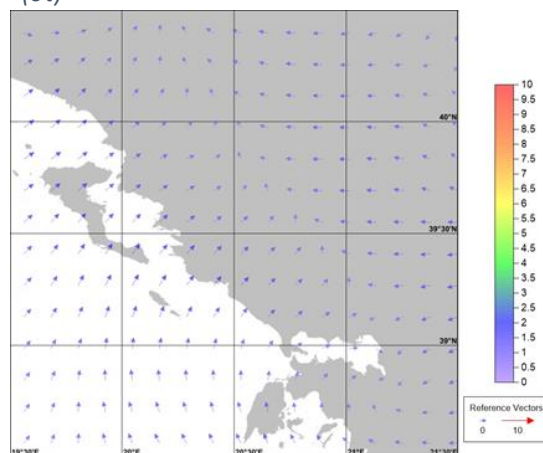
(ε)



(ς)

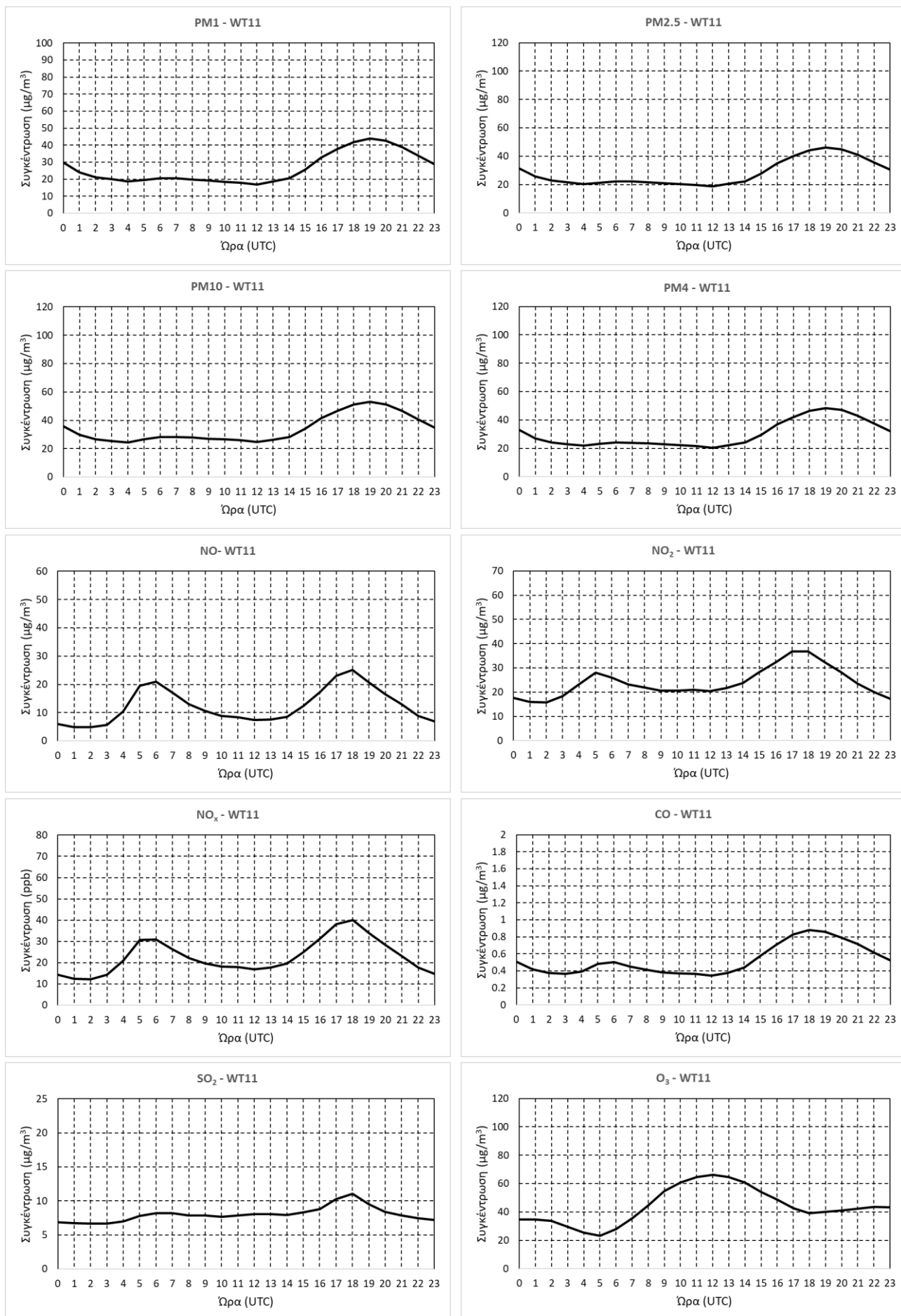


(ζ)



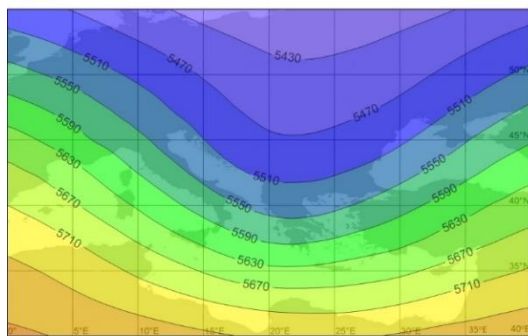
(η)

Σχήμα 3.1.21: WT11: Χάρτες χωρικής κατανομής των γεωδυναμικών υψών (gpm) στις ισοβαρικές επιφάνειες 500hPa (α) και 1000hPa (β) της θερμοκρασίας (°C) στα 850hPa (γ) στην περιοχή της ΝΑ Ευρώπης, της θερμοκρασίας (C) στα 2 μέτρα (ε), της σχετικής υγρασίας (%) στα 2 μέτρα (ς), της ολικής νέφωσης (%) (ζ) και των διανυσμάτων του ανέμου (ταχύτητα σε m/s) (η) στην περιοχή της Ηπείρου. Επίσης εμφανίζεται η μηνιαία κατανομή του αριθμού ημερών (δ).

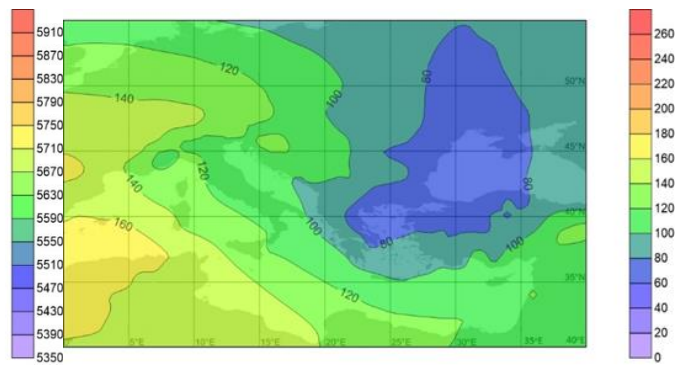


Σχήμα 3.1.22: WT11: Η μέση ενδοημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης των ρύπων.

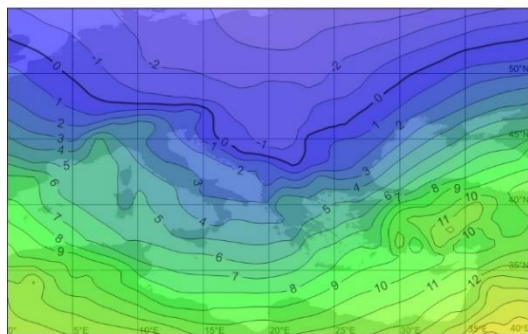
WT12



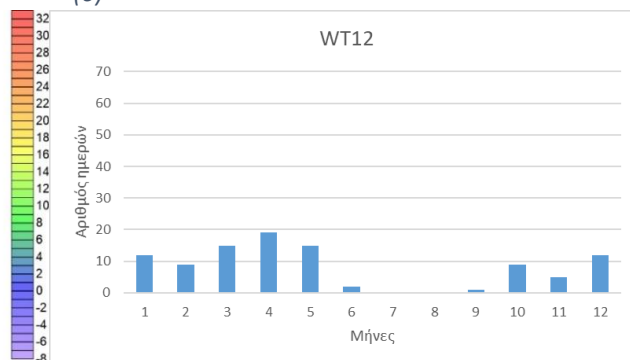
(α)



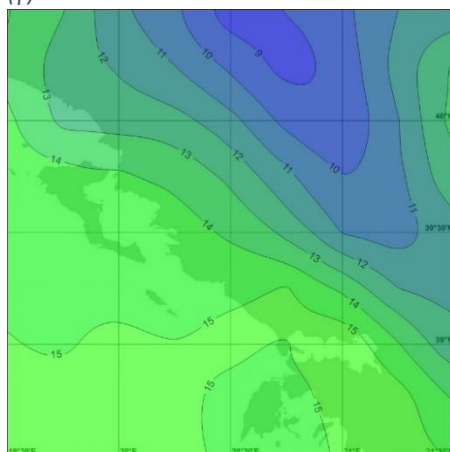
(β)



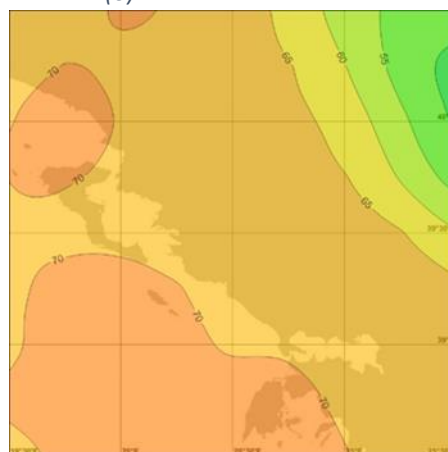
(γ)



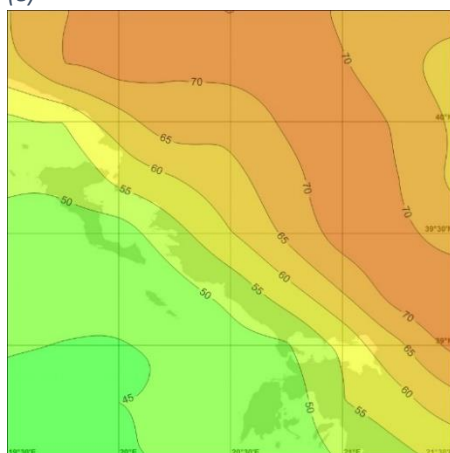
(δ)



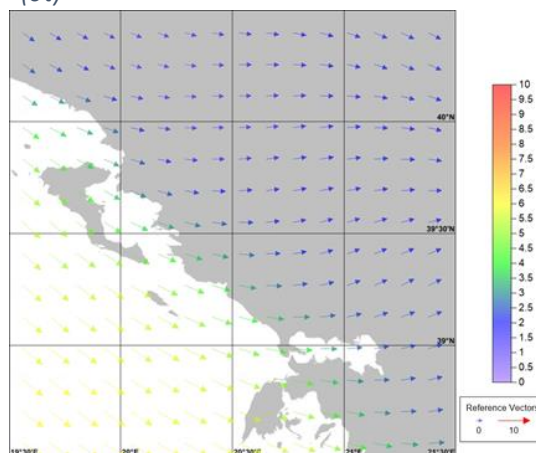
(ε)



(σ)

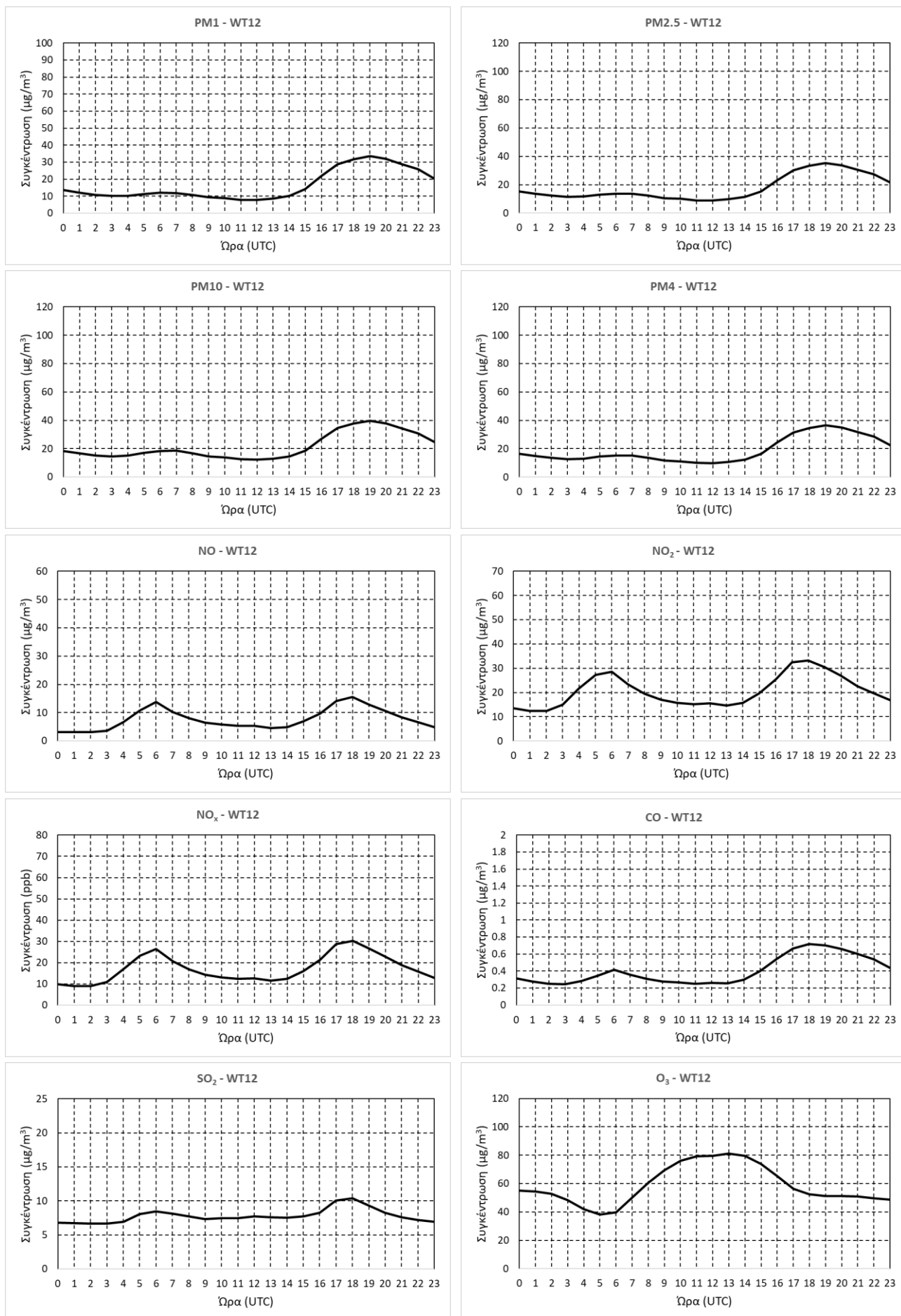


(ζ)

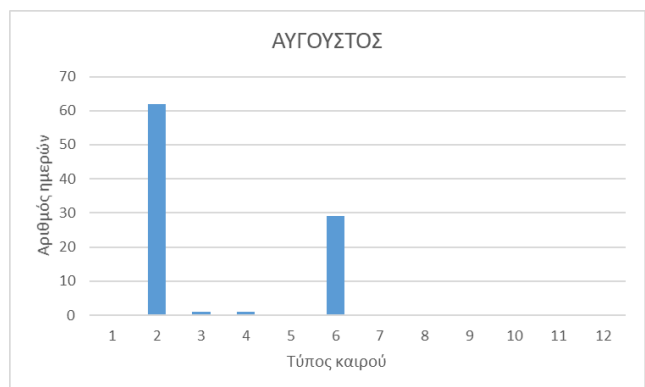
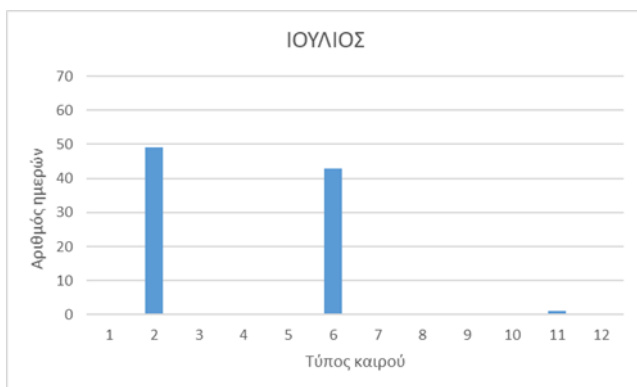
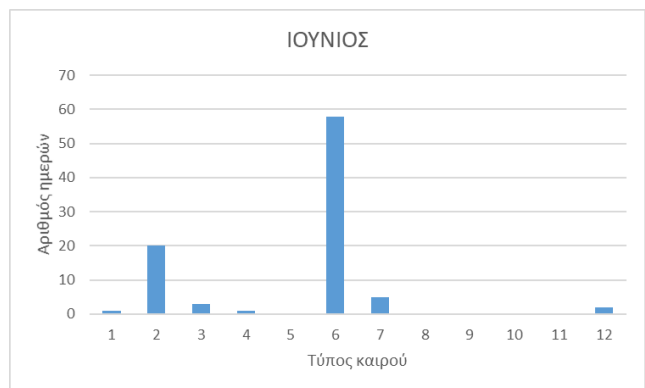
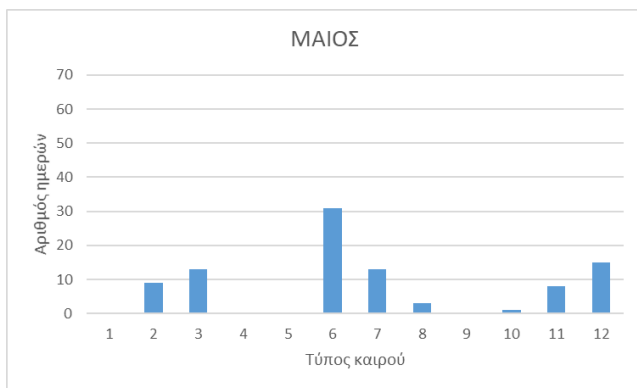
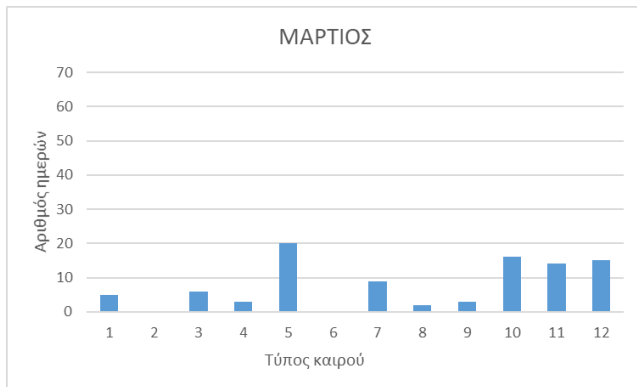
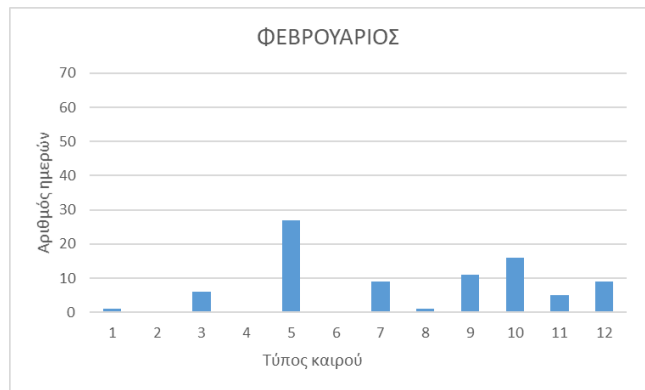
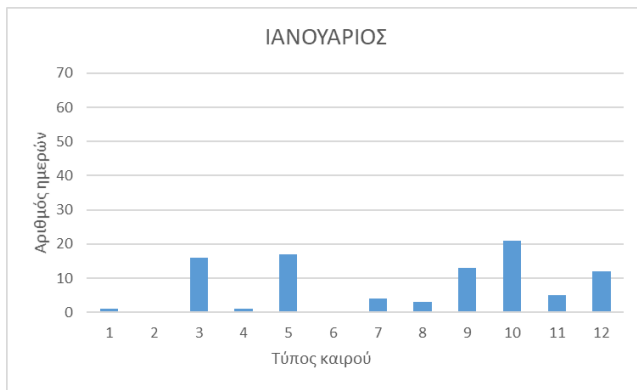


(η)

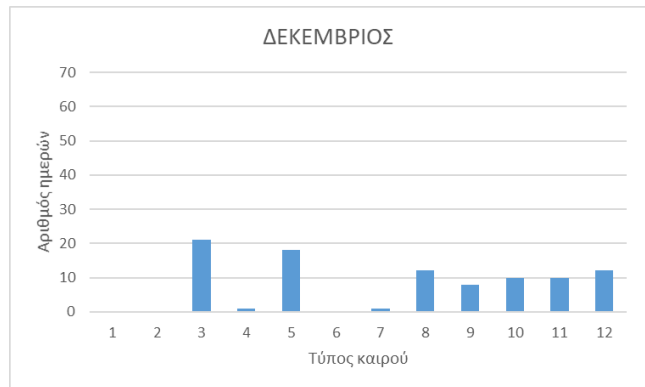
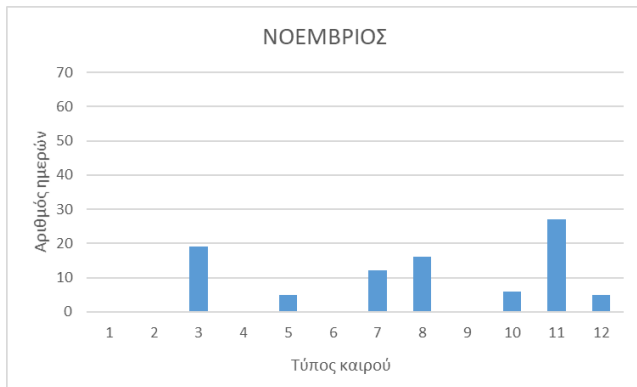
Σχήμα 3.1.23: WT12: Χάρτες χωρικής κατανομής των γεωδυναμικών υψών (gpm) στις ισοβαρικές επιφάνειες 500hPa (α) και 1000hPa (β) της θερμοκρασίας (°C) στα 850hPa (γ) στην περιοχή της ΝΑ Ευρώπης, της θερμοκρασίας (C) στα 2 μέτρα (ε), της σχετικής υγρασίας (%) στα 2 μέτρα (σ), της ολικής νέφωσης (%) (ζ) και των διανυσμάτων του ανέμου (ταχύτητα σε m/s) (η) στην περιοχή της Ηπείρου. Επίσης εμφανίζεται η μηνιαία κατανομή του αριθμού ημερών (δ).



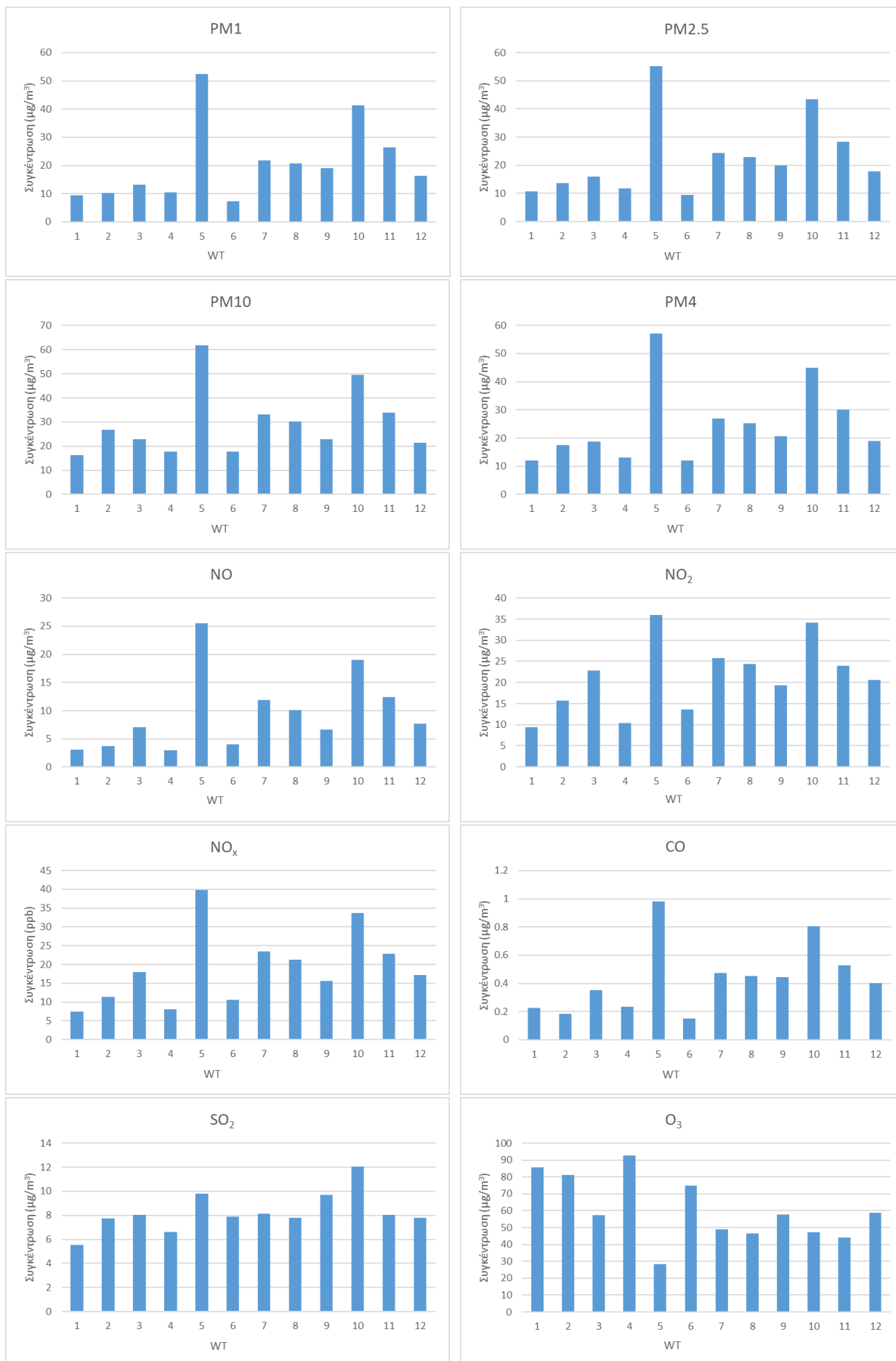
Σχήμα 3.1.24: WT12: Η μέση ενδοημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης των ρύπων.



Σχήμα 3.1.25: Αριθμός ημερών ανά επικράτηση των 12 τύπων καιρού για κάθε μήνα του έτους.



Σχήμα 3.1.25 (συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα): Αριθμός ημερών ανά επικράτηση των 12 τύπων καιρού για κάθε μήνα του έτους.



Σχήμα 3.1.26 : Μέση συγκέντρωση των ρύπων για κάθε ένα από τους 12 τύπους καιρού.

3.2 Υπερβάσεις οριακών τιμών συγκεντρώσεων ρύπων

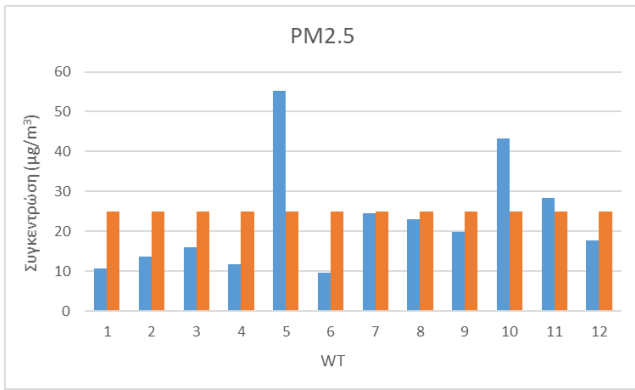
Στη συνέχεια, έγινε μια μελέτη των επιπέδων ρύπανσης για την περιοχή των Ιωαννίνων με βάση τις οριακές τιμές που έχουν οριστεί από τους διεθνείς οργανισμούς. Όπως είναι γνωστό με βάση τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (W.H.O) και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, έχουν θεσπιστεί κάποιες δεσμευτικές οριακές τιμές για τη μέγιστη συγκέντρωση συγκεκριμένων ρύπων που επιτρέπονται στην ατμόσφαιρα. Σκοπός αυτού είναι να διατηρείται η ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα σε ανεκτά, για τον άνθρωπο, επίπεδα. Έτσι, με την μελέτη αυτή αναλύθηκε κατά πόσο και ποιοι ρύποι ξεπερνούν αυτά τα θεσπισμένα όρια. Διαπιστώθηκε ότι οι ρύποι που υπερβαίνουν τις οριακές τιμές είναι οι PM_{2.5}, PM₁₀ και O₃. Οι υπόλοιποι, μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις και τύπους καιρού να παρουσιάζουν μεγάλες συγκεντρώσεις, αυτές όμως είναι εντός των θεσπισμένων οριακών τιμών. Ενδεικτικά, αναφέρουμε ότι για το SO₂ η οριακή ημερήσια τιμή του είναι 350 μg/m³, και δεν πρέπει αυτή να ξεπερνιέται περισσότερο από 24 φορές το έτος. Ομοίως, για το NO₂, η οριακή τιμή είναι 200 μg/m³ και πρέπει να μη γίνεται υπέρβαση αυτής πάνω από 18 φορές σε ωριαία βάση τον χρόνο. Τέλος, για το CO, η οριακή τιμή της συγκέντρωσής του θεσπίζεται σε δωρη βάση και η μέγιστη από τα τρία δωρα της ημέρας δεν πρέπει να ξεπερνά τα 10 mg/m³. Καμία από αυτές τις τιμές δεν ξεπερνιέται κατά την περίοδο μελέτης στην περιοχή των Ιωαννίνων.

Κατασκευάστηκαν, έπειτα, για τους ρύπους που υπερβαίνουν τα όρια (PM_{2.5}, PM₁₀, O₃) δύο ειδών ιστογράμματα, τέτοια ώστε να γίνεται σύγκριση των συγκεντρώσεων (ή του αριθμού περιπτώσεων υπέρβασης) του κάθε ρύπου και των αντίστοιχων οριακών τιμών (Σχήμα 3.2.1). Για τα PM_{2.5}, το Σχήμα 3.2.1(α) αφορά τις συγκεντρώσεις (πραγματικές και οριακές τιμές) ανά τύπο καιρού, ενώ το Σχήμα 3.2.1(β) τις συγκεντρώσεις ανά έτος (π.χ. 1^ο έτος: 14/2/2019-15/2/2020 κοκ.). Για τα PM₁₀ και O₃ τα Σχήματα 3.2.1(γ) και 3.2.1(ε) περιλαμβάνουν τον αριθμό ημερών ανά έτος που ξεπεράστηκαν τα όρια ανά τύπο καιρού, και τα Σχήματα 3.2.1(δ) και 3.2.1(στ) τον συνολικό αριθμό ημερών ανά έτος (πραγματικές και οριακές τιμές).

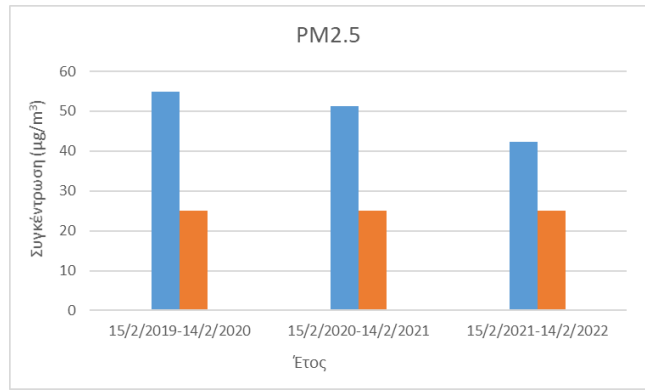
Πιο συγκεκριμένα, για τα PM_{2.5} (Σχήμα 3.2.1(α)), φαίνεται ότι οι συγκεντρώσεις τους ξεπερνούν τις οριακές τιμές (πορτοκαλί χρώμα) κατά τους τύπους καιρού WT5, WT10 και WT11, ενώ ανά έτος (Σχήμα 3.2.1(β)) φαίνεται ότι κάθε χρονιά έχουμε υπέρβαση των ορίων. Η οριακή τιμή των PM_{2.5} είναι 25 μg/m³. Στον WT5 η μέση συγκέντρωση των PM_{2.5} ξεπερνά την τιμή των 55 μg/m³, ενώ στον WT10 αγγίζει τα 43 μg/m³ και στον WT11 φτάνει τα 28 μg/m³. Ως προς τις υπερβάσεις ανά έτος, την πρώτη χρονιά η μέση συγκέντρωση αγγίζει τα 55 μg/m³, την επόμενη τα 51 μg/m³, και τέλος την τρίτη χρονιά η συγκέντρωση φτάνει τα 42 μg/m³.

Για τα PM₁₀, είναι γνωστό ότι η οριακή τιμή είναι 50 μg/m³ και δεν πρέπει να ξεπερνιέται 35 φορές μέσα σε ένα έτος. Όπως γίνεται αντιληπτό από τα ιστογράμματα, στο Σχήμα 3.2.1(γ) στους WT5 και WT10, χειμερινοί τύποι καιρού, φαίνεται να έχουμε υψηλές τιμές. Στο Σχήμα 3.2.1(δ) γίνεται φανερό, ότι κάθε έτος οι συγκεντρώσεις των PM₁₀ ξεπερνούν την οριακή τιμή των 35 ημερών. Μάλιστα, την πρώτη χρονιά υπάρχει υπέρβαση της τιμής κατά 28 ημέρες, τη δεύτερη κατά 5 ημέρες και την τρίτη κατά 8 ημέρες.

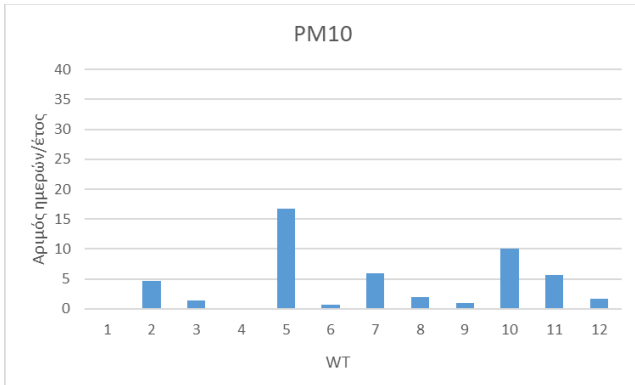
Τέλος, για το O₃, η οριακή τιμή της συγκέντρωσής του θεσπίζεται σε 8ωρη βάση και η μέγιστη από τα τρία 8ωρα της κάθε ημέρας δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή των 120 μg/m³ και να μη γίνεται υπέρβαση της τιμής αυτής περισσότερο από 25 φορές σε ένα έτος. Από τα ιστογράμματα φαίνεται ότι, αρχικά ξεχωρίζουν οι WT2 και WT6, θερινοί τύποι καιρού, με τον WT2 να παρουσιάζει 48 ημέρες την τριετία που να υπερβαίνεται το όριο (Σχήμα 3.2.1(ε)). Ως προς το κάθε έτος (Σχήμα 3.2.1(στ)), ξεχωριστά, μόνο την δεύτερη χρονιά (15/2/2020-14/2/2021) έχουμε υπέρβαση της οριακής τιμής κατά 7 ημέρες, όπου αγγίζεται συνολικά ο αριθμός των 32 ημερών που ξεπερνούν την τιμή των 120 μg/m³.



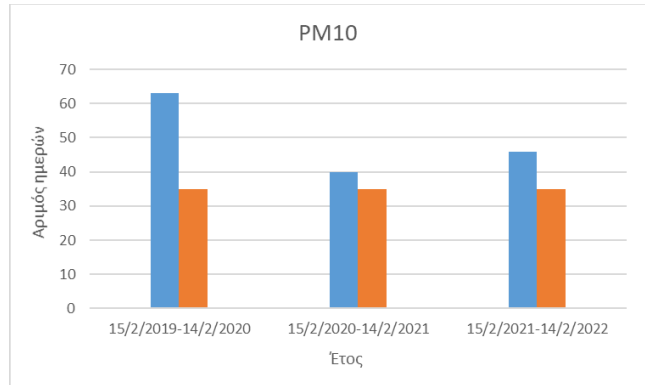
(α)



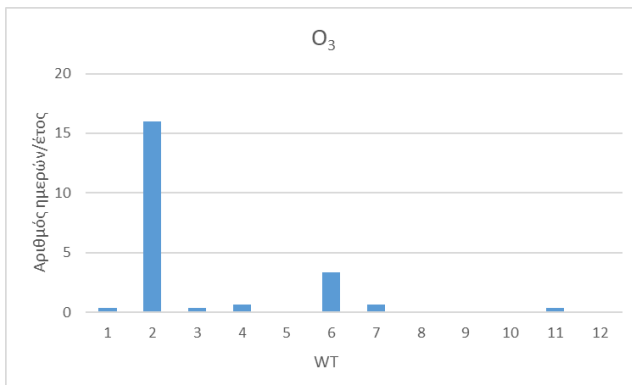
(β)



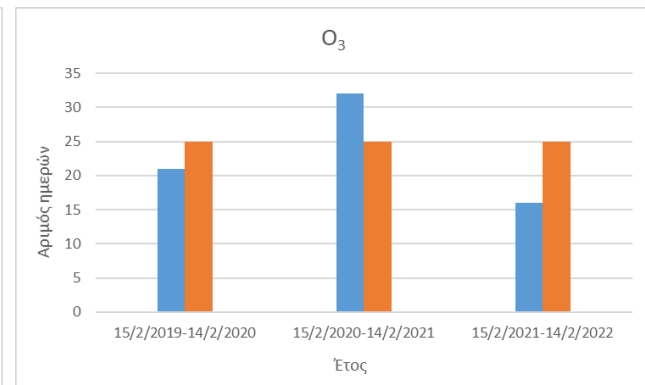
(γ)



(δ)



(ε)



(στ)

Σχήμα 3.2.1.: Ιστογράμματα που παρουσιάζουν το βαθμό υπέρβασης των οριακών τιμών συγκεντρώσεων ή αριθμού ημερών για τους ρύπους PM2.5, PM10 και O₃. Οι πορτοκαλί στήλες αναφέρονται στις οριακές τιμές.

3.3 Εξέλιξη συγκέντρωσης ρύπων για περιπτώσεις συνεχόμενων ημερών επικράτησης του ίδιου τύπου καιρού

Ακολουθώς, για τον κάθε ρύπο και κάθε τύπο καιρού, για τον οποίο υπερβαίνονται τα θεσπισμένα όρια και αυξάνουν έτσι τα επίπεδα ρύπανσης, έγινε μια επιπλέον μελέτη της εξέλιξης της συγκέντρωσης του ρύπου σε ακολουθία συνεχόμενων ημερών επικράτησης του ίδιου τύπου καιρού. Δημιουργήθηκαν, λοιπόν, διαγράμματα, για τον κάθε ρύπο ξεχωριστά (PM_{2.5}, PM₁₀, O₃), για τους αντίστοιχους τύπους καιρού που οδηγούν σε φαινόμενα ρύπανσης (WT5 και WT10 για τους PM_{2.5} και PM₁₀ και WT2 για O₃). Στα διαγράμματα αυτά παρουσιάζεται η συγκέντρωση των ρύπων σε ακολουθίες συνεχόμενων ημερών που τυγχάνει να ανήκουν σε κάποιον από τους παραπάνω τύπους καιρού. Παράλληλα, κατασκευάστηκαν και αντίστοιχα διαγράμματα της μέσης τιμής της συγκέντρωσης συγκεκριμένου αριθμού συνεχόμενων ημερών.

Ειδικότερα για τα PM_{2.5} (Σχήμα 3.3.1), παρατηρούμε ότι ο αριθμός συνεχόμενων ημερών που εμφανίζονται στον WT5 είναι μια περίπτωση των 6 ημερών, δυο περιπτώσεις των 5 και τρεις περιπτώσεις των 4 ημερών, ενώ στον WT10 εμφανίζονται μια περίπτωση 4 ημερών και δέκα περιπτώσεις των 3 ημερών. Από τα διαγράμματα, δεν μπορούμε να βγάλουμε κάποιο ουσιαστικό συμπέρασμα μελετώντας μια προς μία τις περιπτώσεις, καθώς η πορεία των ρύπων δεν ακολουθεί μια παρόμοια μορφή σε όλες. Θα μπορούσαμε να πούμε ίσως, ότι με βάση τα διαγράμματα των μέσων τιμών (Σχήμα 3.3.2) στον WT10 η συγκέντρωση των ρύπων αυξάνεται από την πρώτη στην τέταρτη και από την πρώτη στην τρίτη, αντίστοιχα, μέρα. Αυτό έχει να κάνει πιθανότατα με τη λογική συσσώρευσης των ρύπων λόγω της εμμονής των συνθηκών που την ευνοούν.

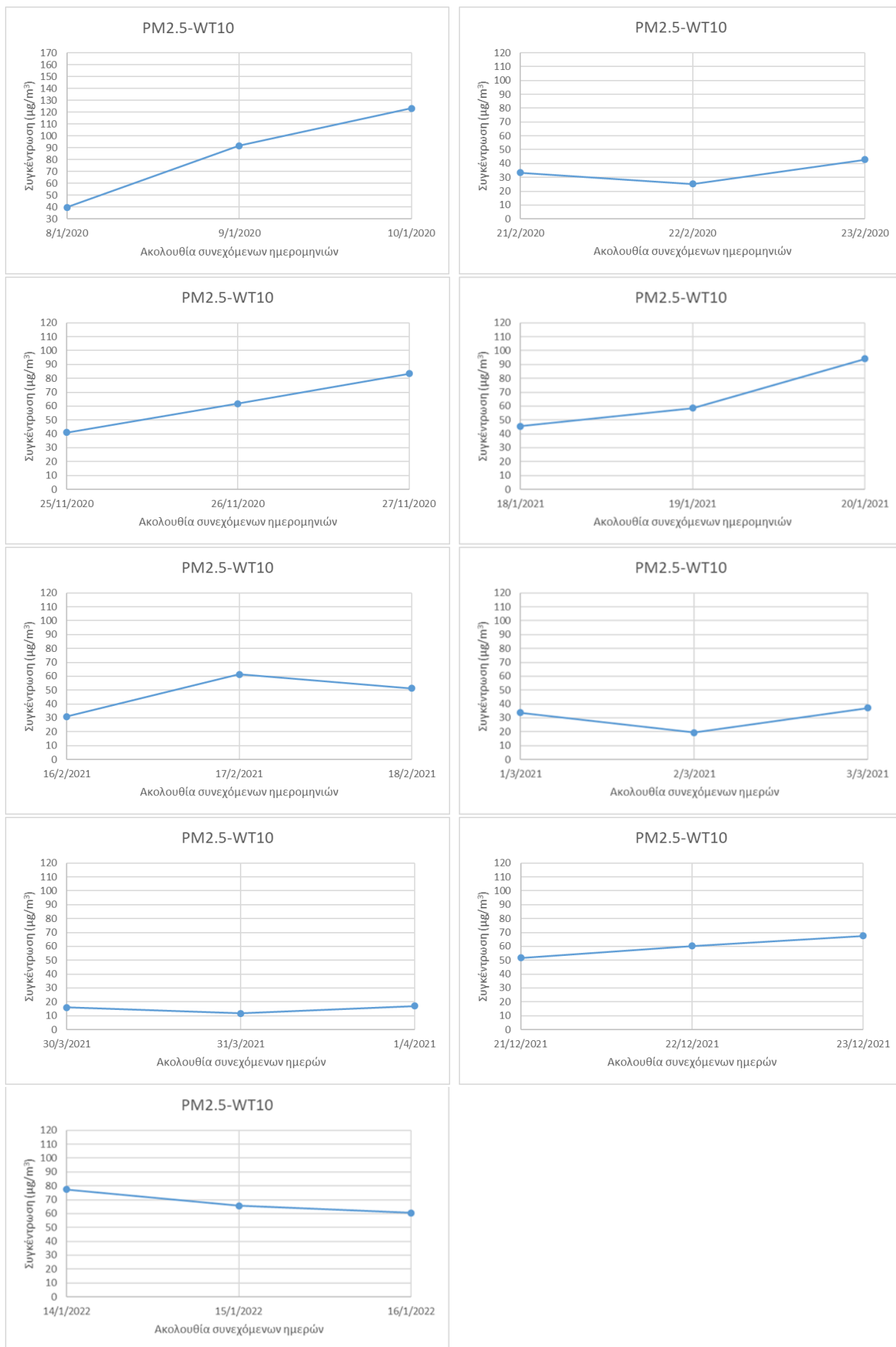
Ομοίως, για τα PM₁₀ (Σχήμα 3.3.3) ο αριθμός συνεχόμενων ημερών που εμφανίζονται στον WT5 είναι μια περίπτωση των 6 ημερών, δυο περιπτώσεις των 5 και τρεις περιπτώσεις των 4 ημερών, ενώ στον WT10 έχουμε μια περίπτωση 4 ημερών και δέκα περιπτώσεις των 3 ημερών και τα συμπεράσματα είναι ανάλογα με τα αντίστοιχα των PM_{2.5}. Παρατηρούμε, σίγουρα, ότι τα σωματίδια PM₁₀ και PM_{2.5} ακολουθούν όμοια συμπεριφορά, ως προς την συγκέντρωση (Σχήμα 3.3.4).

Εν συνεχεία, για το O₃ (Σχήμα 3.3.5), για τον WT2 ο αριθμός συνεχόμενων ημερών που εμφανίζονται είναι μία περίπτωση 16 ημερών, μία περίπτωση 12 ημερών, δυο περιπτώσεις 9 ημερών, μία 8 ημερών, τέσσερις των 7 ημερών, δυο των 6 και, τέλος, δύο περιπτώσεις των 5 ημερών. Ωστόσο, και πάλι, δεν μπορούμε να καταλήξουμε σε κάποιο ουσιαστικό συμπέρασμα ως προς τη συμπεριφορά της συγκέντρωσης του ρύπου, μιας και, δεν παρατηρούμε σε όλες τις περιπτώσεις παρόμοια διακύμανση. Επίσης, σε κάποια περίπτωση, ενώ μπορεί αρχικά να αυξάνεται η συγκέντρωση του ρύπου, στη συνέχεια μπορεί να μειώνεται, και πάλι έπειτα, να αυξάνεται, με αποτέλεσμα να μην ακολουθεί μια σταθερή πορεία και να δυσκολεύει την εξαγωγή κάποιου συμπεράσματος.

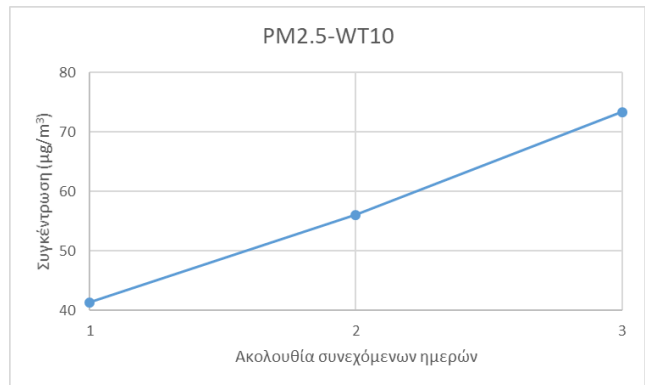
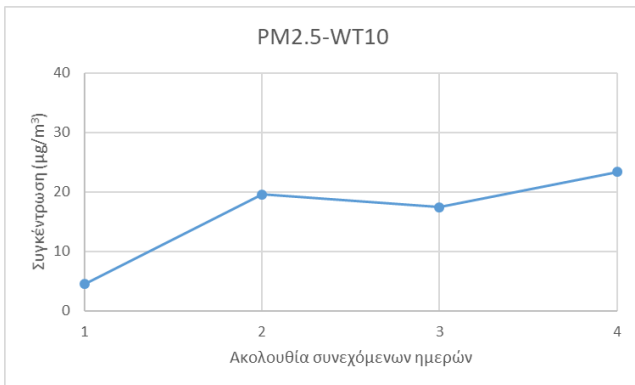
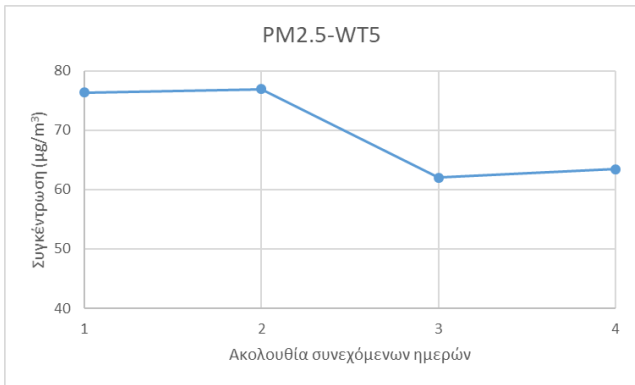
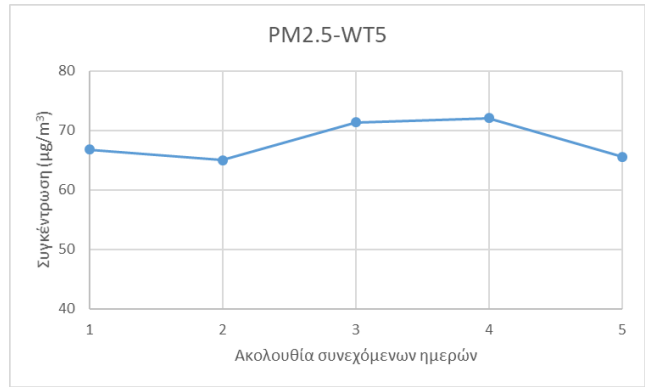
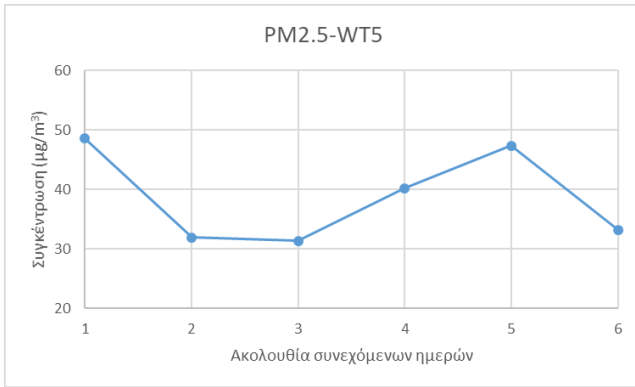
PM2.5



Σχήμα 3.3.1: Εξέλιξη συγκέντρωσης των PM2.5 σε περιπτώσεις συνεχόμενων ημερών επικράτησης των WT5 και WT10.

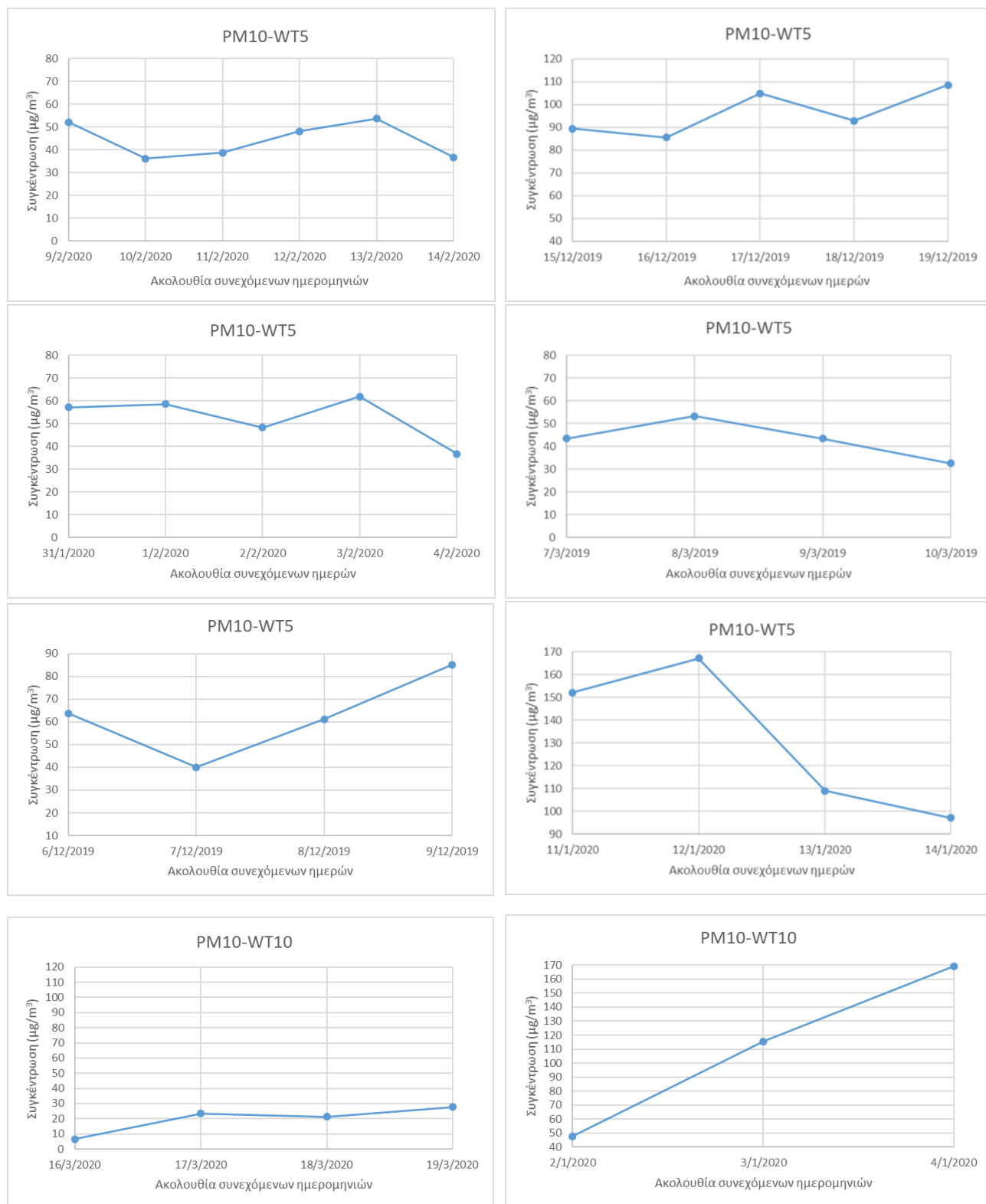


Σχήμα 3.3.1(συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα): Εξέλιξη συγκέντρωσης των PM2.5 σε περιπτώσεις συνεχόμενων ημερών επικράτησης των WT5 και WT10.

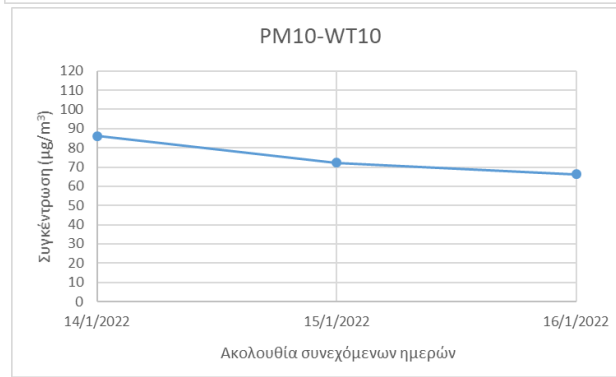
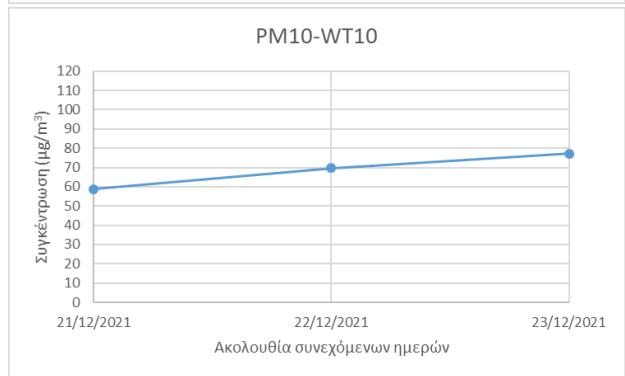
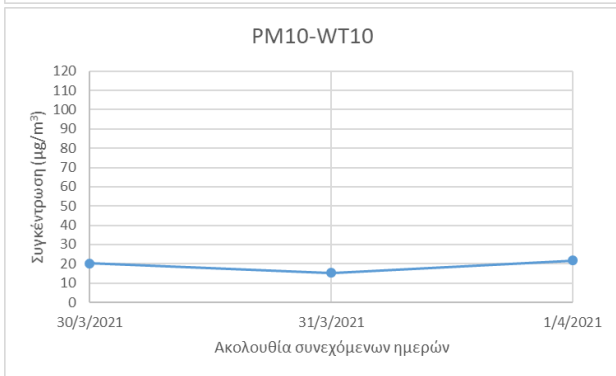
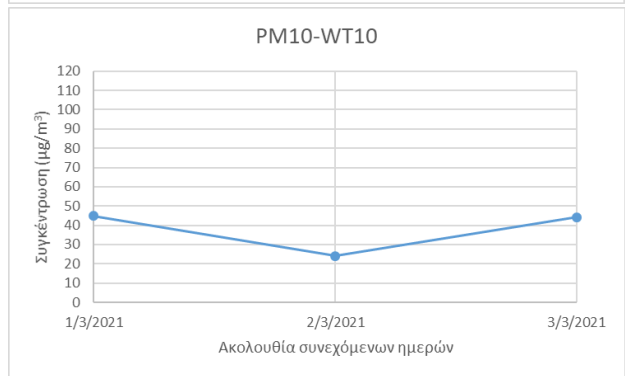
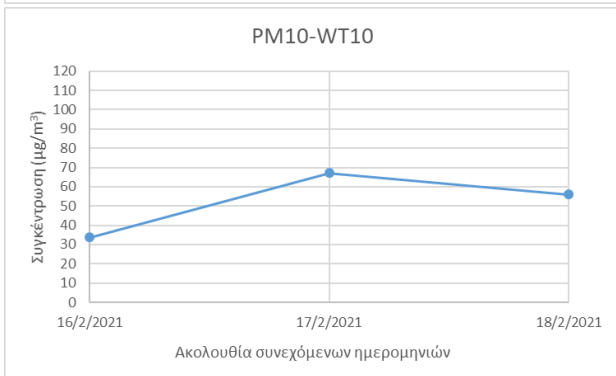
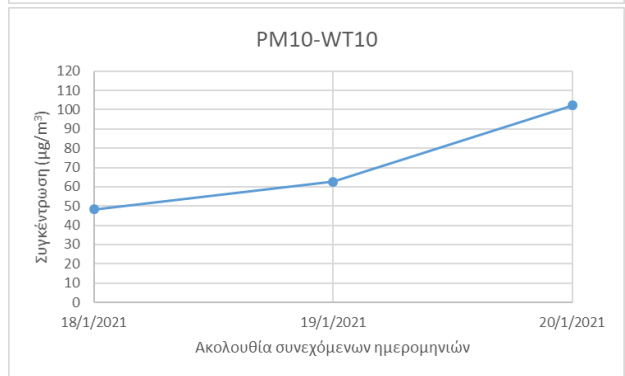
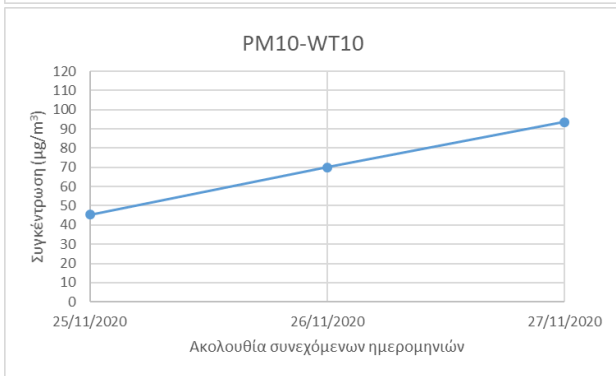
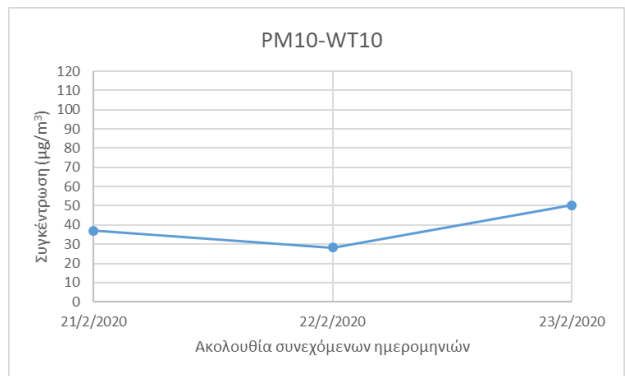
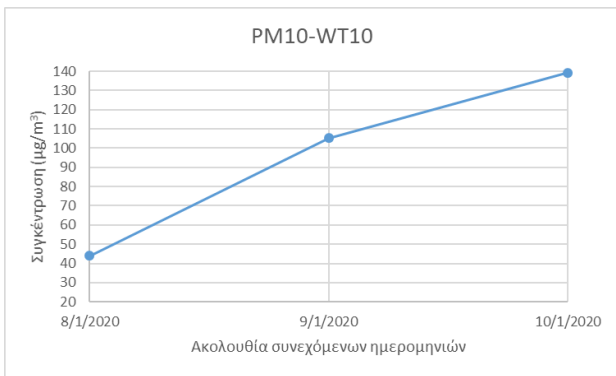


Σχήμα 3.3.2: Εξέλιξη της μέσης συγκέντρωσης των PM2.5 των αντίστοιχων περιπτώσεων συνεχόμενων ημερών επικράτησης των WT5 και WT10 του Σχήματος 3.3.1.

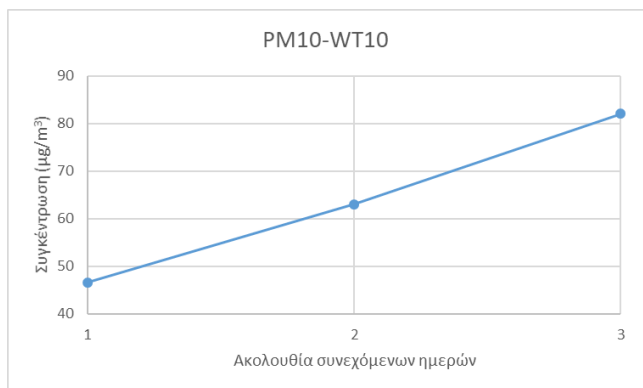
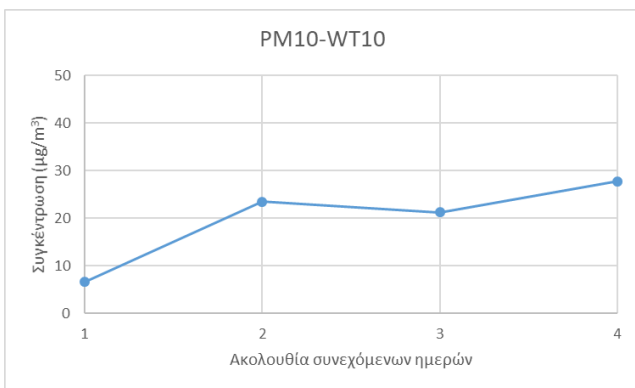
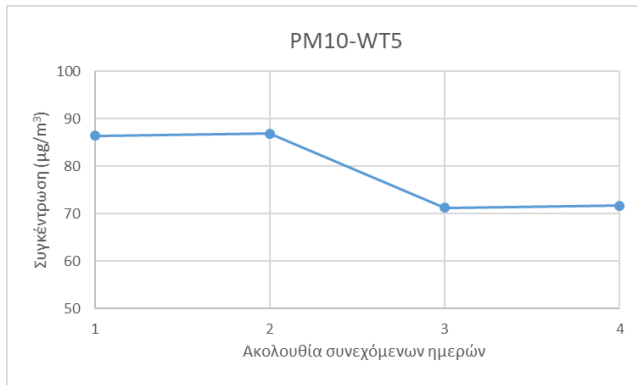
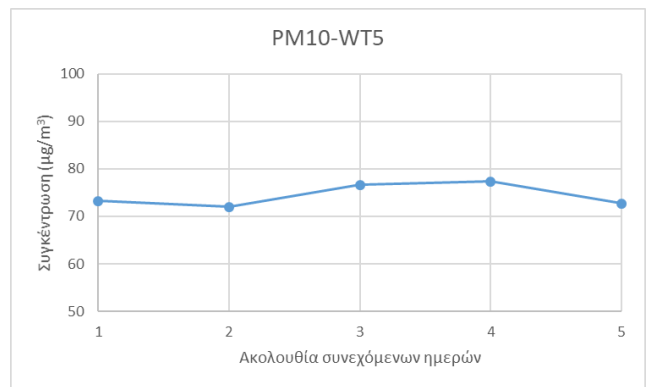
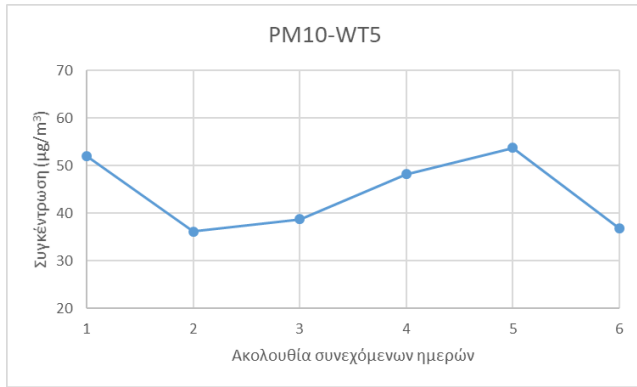
PM10



Σχήμα 3.3.3: Εξέλιξη συγκέντρωσης των PM10 σε περιπτώσεις συνεχόμενων ημερών επικράτησης των WT5 και WT10.

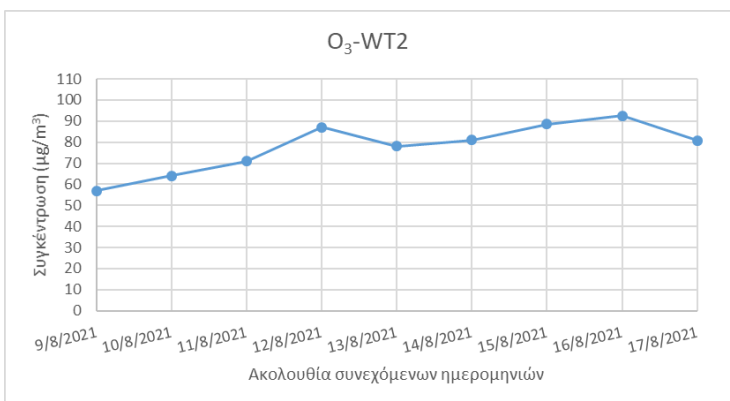
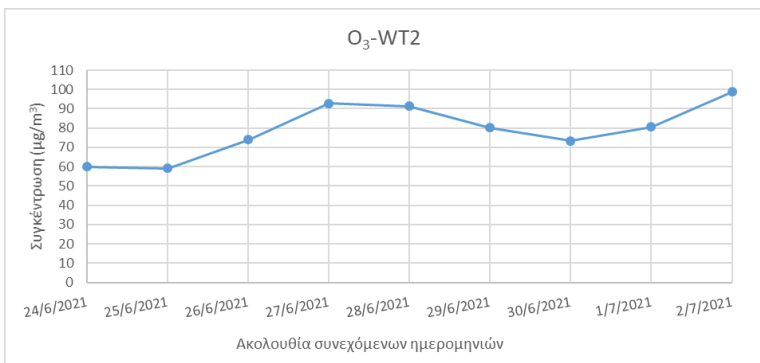
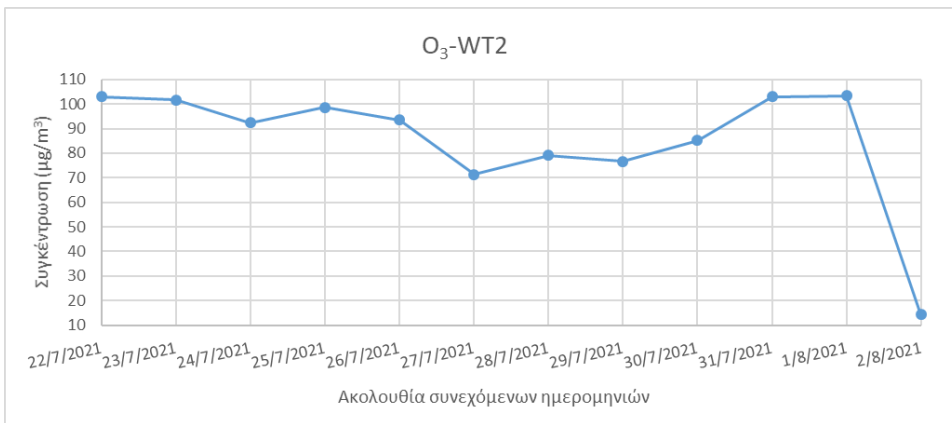
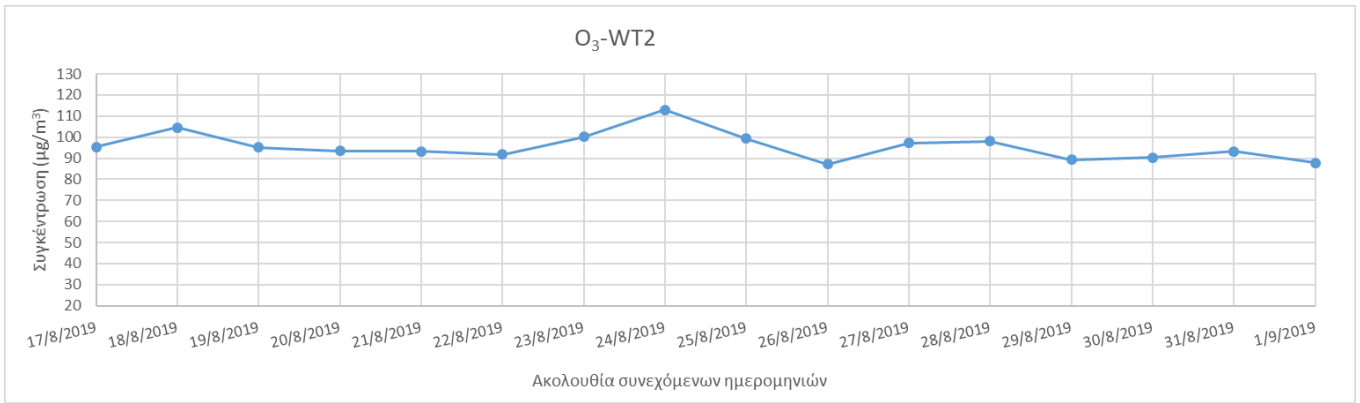


Σχήμα 3.3.3(συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα): Εξέλιξη συγκέντρωσης των PM2.5 σε περιπτώσεις συνεχόμενων ημερών επικράτησης των WT5 και WT10.

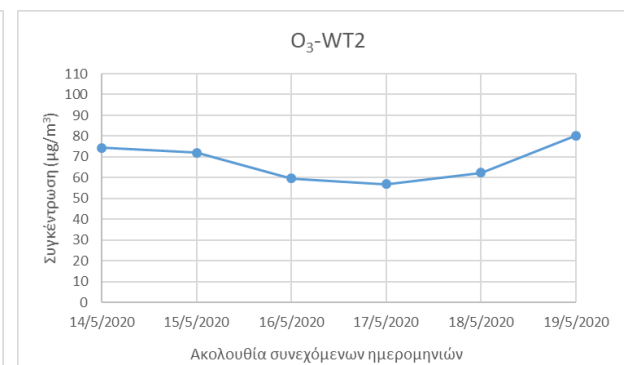
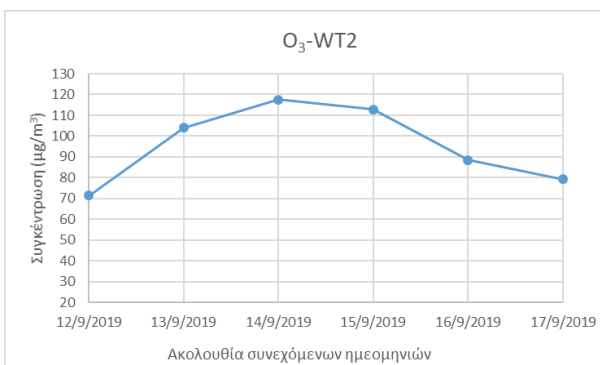
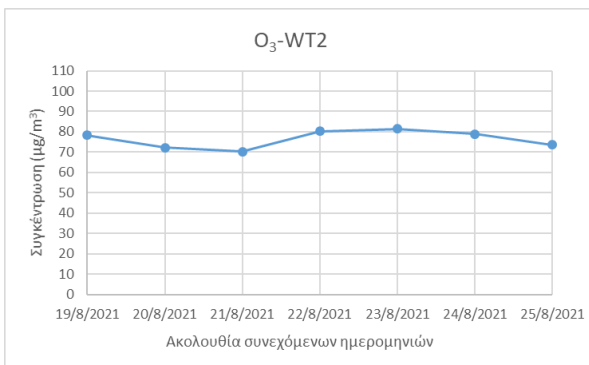
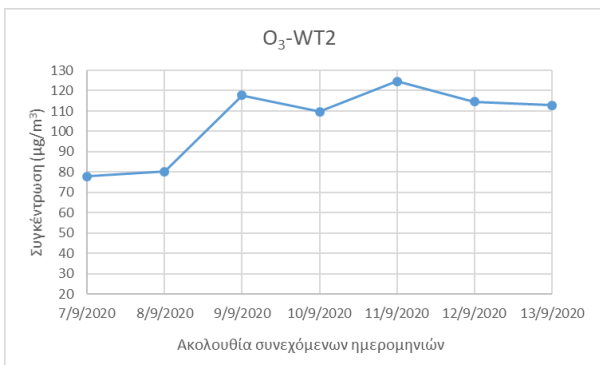
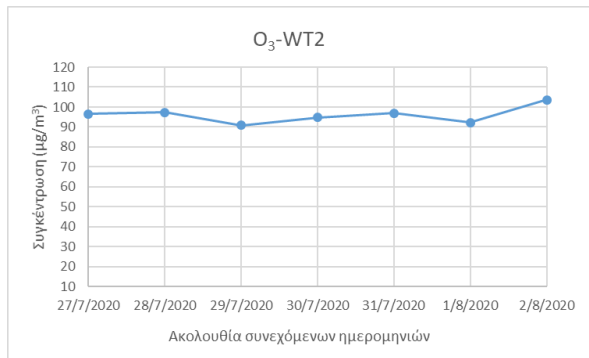
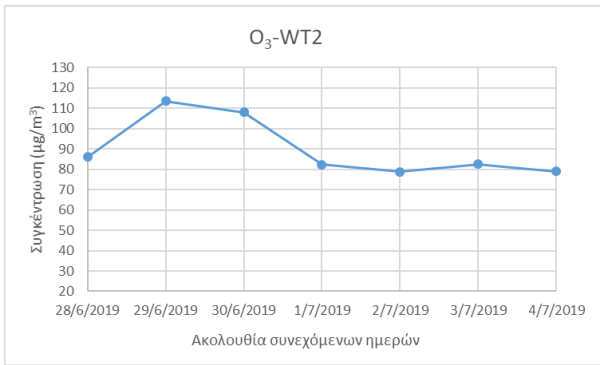
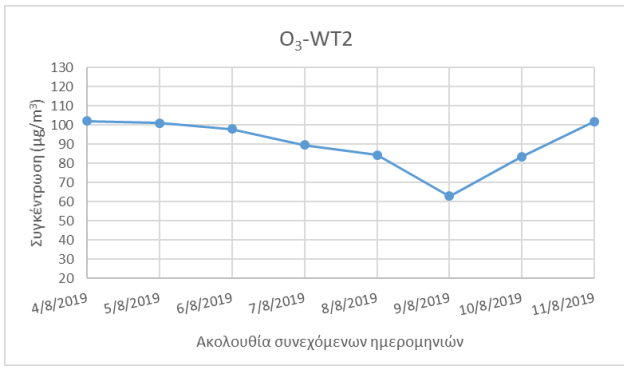


Σχήμα 3.3.4: Εξέλιξη της μέσης συγκέντρωσης των PM2.5 των αντίστοιχων περιπτώσεων συνεχόμενων ημερών επικράτησης των WT5 και WT10 του Σχήματος 3.3.3.

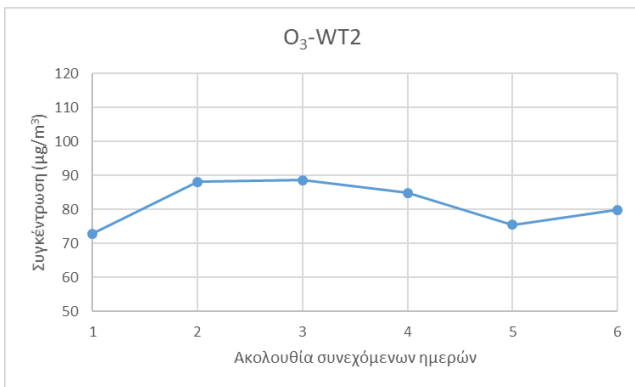
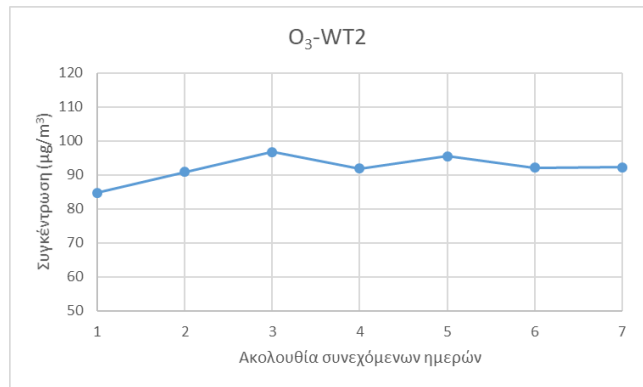
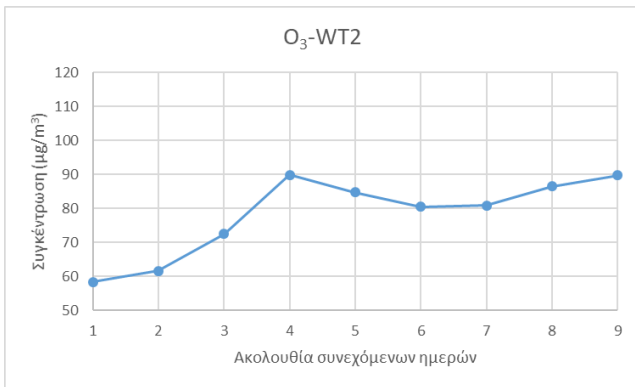
Ο₃



Σχήμα 3.3.5: Εξέλιξη συγκέντρωσης του O₃ σε περιπτώσεις συνεχόμενων ημερών επικράτησης του WT2.



Σχήμα 3.3.5(συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα): Εξέλιξη συγκέντρωσης του O₃ σε περιπτώσεις συνεχόμενων ημερών επικράτησης του WT2.



Σχήμα 3.3.6: Εξέλιξη της μέσης συγκέντρωσης του O_3 των αντίστοιχων περιπτώσεων συνεχόμενων ημερών επικράτησης των WT2 του Σχήματος 3.3.5.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία, ερευνήθηκε για την τριετία 15/2/2019-14/2/2022 η εξάρτηση των επιπέδων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τις συνοπτικές συνθήκες που επικρατούν στην πόλη των Ιωαννίνων. Ορίστηκαν 12 τύποι καιρού σε καθημερινή βάση και εξετάστηκαν οι συνθήκες που επικρατούν σε αυτούς και ευνοούν τα υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Διαπιστώθηκε ότι όλες οι συγκεντρώσεις ρύπων είναι σημαντικά υψηλότερες κατά τη διάρκεια δύο αντικυκλωνικών τύπων που επικρατούν την ψυχρή περίοδο του έτους, ενώ οι ημερήσιες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων επηρεάζονται από τις ημερήσιες διακυμάνσεις της κυκλοφορίας, τις διαδικασίες καύσης και την ηλιακή ακτινοβολία.

Πιο συγκεκριμένα:

- Η αντικυκλωνική δραστηριότητα σχετίζεται με καθαρό, ανέφελο ουρανό, ευνοεί τις καθοδικές κινήσεις του αέρα, τις σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, ιδιαίτερα την νύχτα και νωρίς το πρωί και την κυριαρχία επιφανειακών αναστροφών, που ευθύνονται για υψηλές συγκεντρώσεις των περισσότερων ατμοσφαιρικών ρύπων κατά την ψυχρή περίοδο του έτους.
- Η θερμοκρασία είναι μια παράμετρος που επηρεάζει έμμεσα τη συγκέντρωση των ρύπων. Σχετίζεται, κυρίως, με την εκπομπή των ρύπων, ιδιαίτερα τους χειμερινούς μήνες, για την θέρμανση των κτηρίων, αλλά και για τις μετακινήσεις με τα μέσα μεταφοράς. Εξάλλου, όσον αφορά το O₃, η συγκέντρωσή του αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας, μιας και ο σχηματισμός του απαιτεί την παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία με την σειρά της, επιδρά άμεσα στην αύξηση της θερμοκρασίας.
- Η θέρμανση των σπιτιών, κατά το χειμώνα ή και τις μεταβατικές εποχές του έτους, που συνδέεται με την καύση βιομάζας και οι αναστροφές θερμοκρασίας οδηγούν σε ένα βραδινό μέγιστο κατά την ημερήσια διακύμανση των περισσότερων ατμοσφαιρικών ρύπων.
- Το O₃ είναι ο μόνος ρύπος που διαπιστώνεται ότι αυξάνει τη συγκέντρωσή του κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου του έτους, λόγω της φωτοχημικής του προέλευσης.
- Η ταχύτητα του ανέμου, συμβάλει σημαντικά στην αραίωση των ρύπων και τον «καθαρισμό» της ατμόσφαιρας της πόλης. Αυτό ισχύει για όλους τους ρύπους εκτός του O₃, διότι η παρουσία οξειδίων του αζώτου στην ατμόσφαιρα ευνοεί την καταστροφή του O₃, και επομένως για ιδιαίτερα υψηλές τιμές της ταχύτητας του ανέμου, τα επίπεδα συγκέντρωσής του παραμένουν σχετικά υψηλά.
- Η διεύθυνση του ανέμου, σε συνδυασμό με την ταχύτητα αυτού, επιδρά στα ποσοστά των επιπέδων ρύπανσης. Συνήθως, οι βόρειοι άνεμοι είναι αυτοί με τη μεγαλύτερη ισχύ, και βοηθούν στην απομάκρυνση των ρύπων. Αντίθετα, άνεμοι νότιας και νοτιοδυτικής διεύθυνσης, συνήθως, ενισχύουν την παρουσία των ρύπων στην ατμόσφαιρα, ενώ πολλές φορές και η θάλασσα αύρα αδυνατεί να απομακρύνει τους ρύπους.

- Δεν παρατηρείται κάποια ουσιαστική συσχέτιση της σχετικής υγρασίας με τη συγκέντρωση των ρύπων στην ατμόσφαιρα. Η μόνη διαπίστωση που μπορεί να αναφερθεί είναι το ότι η σχετική υγρασία μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, και το αντίστροφο. Η θερμοκρασία, με τη σειρά της όμως, επιδρά έμμεσα στην συγκέντρωση, όπως ανάφθηκε ξανά. Η συγκέντρωση των ρύπων είναι υψηλή για χαμηλές τιμές της θερμοκρασίας, και κατ' επέκταση για υψηλές τιμές της σχετικής υγρασίας. Ταυτόχρονα, η παρουσία O_3 στην ατμόσφαιρα σχετίζεται άμεσα με την παρουσία της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία, όπως αναμενόταν αυξάνει την θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, και μειώνει τη σχετική υγρασία.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη των συνθηκών ποιότητας του αέρα στα Ιωάννινα, λίγες μέρες νωρίτερα, τόσες, όσες και το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την ακριβή πρόβλεψη της εμφάνισης ενός συνοπτικού συστήματος σε μια περιοχή, με πολύ σημαντικό ποσοστό ακρίβειας. Το χρονικό, αυτό, διάστημα είναι αρκετό, ώστε να μπορούν οι αρχές να διαχειριστούν πιθανά επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης και να λάβουν τις κατάλληλες αποφάσεις και τα απαιτούμενα διορθωτικά μέτρα για την αποφυγή αυτών.

Η μεθοδολογία αυτή και η ταξινόμηση των τύπων καιρού, που έγινε για τα Ιωάννινα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλες περιοχές, πιθανόν μεγαλουπόλεις, που υποφέρουν από αυξημένες συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρύπων και αντιμετωπίζουν σημαντικά προβλήματα επεισοδίων ρύπανσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής

- Avila A., Queralt-Mitjans I., Alarcón M. (1997) Mineralogical composition of African dust delivered by red rains over northeastern Spain. *Journal of Geophysical Research*, 102: 21977-21996.
- 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: 359-373.
- Baur F., Hess P., Nagel H. (1944) *Kalendar der Grosswetterlagen Europas 1881–1939*. Bad Homburg, Germany, 35pp.
- Boy M., Kulmala M. (2002) Influence of spectral solar irradiance on the formation of new particles in the continental boundary layer. *Atmospheric Chemistry Physics Discuss*, 2: 1317 – 1350.
- Chaloulakou A., Kassomenos P., Grivas G., Manalis N., Spyrellis N. (2001) On the PM10 /PM2s episodes in Athens in the summer of 2000. In 7th International Conference on Environmental Science and Technology, Conference Proceedings, Syros, Greece, Vol. A, pp. 114-122.
- Chung K.K., Chan J.C.L., Ng C.N., Lam K.S., Wang, T. (1999) Synoptic conditions associated with high carbon monoxide episodes at a coastal station in Hong Kong, *Atmospheric Environment* 33, 3087-3095.
- Colbeck I., Chung Meng-Chen, Eleftheriadis K. (2002) Formation and transport of atmospheric aerosol over Athens, Greece. *Water Air Soil Poll*, 2: 223–235.
- Comrie A.C., Yarnal B. (1992) Relationships between Synoptic Scale Atmospheric Circulation and Ozone Concentrations in Metropolitan Pitts burgh, Pennsylvania, *Atmospheric Environment* 26B, 301-312.
- Copernicus Climate Change Service (C3S). (2017) ERA5: fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS).
- Dorling S.R., Davies T.D. (1995) Extending Cluster Analysis-Synoptic Meteorology Links to Characterize Chemical Climates at Six Northwest ern European Monitoring Stations, *Atmospheric Environment*, 29: 145- 167.
- Dzerdzevskii BL. (1963) Fluctuations of climate and of general circulation of the atmosphere and climate in the twentieth century *Changes of Climate Arid Zone Research* 20, Paris, UNESCO, 285-295.
- Federov E. (1925) The study of monthly climate variability with the daily weather types (in Russian) *Journal of Geophysics and Meteorology*, 2: 5-16.
- Franceschini F, Galetto M., Maisano D. (2005) A Short Survey on Air Quality Indicators: Properties, Use and (Mis)use. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 16: 490-504.

Greene J.S., Kalkstein L.S., Ye H., Smoyer K. (1999) Relationships between Synoptic Climatology and Atmospheric Pollution at 4 U.S. Cities, *Theoretical and Applied Climatology*, 62: 163-174.

Hersbach H. and Dee D. (2016) ERA5 reanalysis is in production, *ECMWF Newsletter* No. 147, 7.

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.N. (2020) The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146: 1999-2049.

Huth R, Beck C, Philipp A, Demuzere M, Ustrnul Z, Cahynová M, Kyselý J, Tveito OE. (2008) Classifications of atmospheric circulation patterns: recent advances and applications. *Trends and Directions in Climate Research: Annals of New York Academic Sciences*, 1146: 105-152.

Jolliffe. (1993) Principal component analysis: A beginner's guide - II. Pitfalls, myths and extensions. *Weather*, 48: 246-253.

Jolliffe IT. *Principal Component Analysis*. Springer, 1986.

Kalkstein L.S., Corrigan P. (1986) A Synoptic Climatological Approach for Geographical Analysis, *Annals of the American Association of Geographers*, 76: 381-395.

Kalkstein LS, Davis RE, Rao MN. (1990) On Weather and Human Mortality. *Annals of the Association of American Geographers*, 80: 295-299.

Karatzas K., Mousiopoulos N. (2002) Urban air quality management and information system in Europe: legal framework and information access. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, 2: 263-272.

Kassomenos P, Flocas HA, Lycoudis S, Petrakis M. (1998) Analysis of mesoscale patterns in relation to synoptic conditions over the Urban Mediterranean Basin *Theoretical and Applied Climatology*, 59: 215-229.

Kassomenos P., Kotroni V., Kallos G. (1995) Analysis of climatological and air quality observations from greater Athens area. *Atmospheric Environment*, 29: 3671 – 3688.

Kassomenos P.A., Flocas H.A., Lykoudis S., Skouloudis A. (1998) Spatial and temporal characteristics of the relationship between air quality status and mesoscale circulation over an urban Mediterranean basin. *Science of The Total Environment*, 217: 37 – 57.

Kassomenos P.A., Sindosi O.A., Lolis C.J. (2003) On the relationship between seasonal traffic patterns and spatial characteristics of air quality in Athens, Greece.

- Kassomenos P.A., Sindosi O.A., Lolis C.J. (2003) Seasonal variation of the circulation types occurring over southern Greece: a 50-year study. *Climate Research*, 24: 33-46.
- Kostopoulou E. (2003) The relationships between atmospheric circulation patterns and surface climatic elements in the Eastern Mediterranean PhD Thesis, University of East Anglia, Norwich, 407pp.
- Maheras P. (1984) Weather-Type Classification by factor analysis in the Thessaloniki area *Journal of Climatology*, 4: 437-443.
- Manly BFJ, Navarro Alberto Jorge A. (2017) *Multivariate Statistical Methods: A Primer*, Fourth Edition, Chapman & Hall, London, 121 pp.
- Manly BFJ. (1986) *Multivariate statistical methods: a primer*. Chapman and Hall, London, 159 pp.
- Massart B.G.J., Kvalheim O.M., Stige L., Aasheim R. (1998) Ozone forecasting from meteorological variables, Part II, Daily maximum ground-level O₃ concentration from local weather forecasts. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 42: 191 – 197.
- McGregor R.G., Bamzeli D. (1995) Synoptic Typing and Its Application to the Investigation of Weather Air Pollution Relationships, Birmingham, United Kingdom, *Theoretical and Applied Climatology*, 51: 223-236.
- Overland J.E. and Preisendorfer R.W. (1982) A significance test for principal components applied to a cyclone climatology. *Monthly Weather Review*, 110: 1-4.
- Papanastasiou D.K., Melas D. (2007) Statistical characteristics of ozone and PM₁₀ levels in a medium sized Mediterranean city. *Special Issue on Air Pollution, International Journal of Environment and Pollution.*, in press.
- Papanastasiou D.K., Melas D., Kioutsoukios I. (2007) Development and assessment of neural network and multiple regression models in order to predict PM₁₀ levels in a medium sized Mediterranean city. *Water, Air, & Soil Pollution*, in press.
- Prezerakos N. (1997) Dust storms over Sahara Desert leading to dust deposit or coloured rain in the South Balkans 1st LAS/WMO International Symposium on Sand and Dust Storms, Damascus, Syria WMO Technical Document, 864: 21–38.
- Prezerakos N, Paliatsos AG, Koukouletsos KV. (2010) Diagnosis of the Relationship between Dust Storms over the Sahara Desert and Dust Deposit or Coloured Rain in the South Balkans *Advances in Meteorology*, doi:10.1155/2010/76054.
- Sanchez-Ccoyllo M., de Fatima, A. (2002) The influence of meteorological conditions on the behaviour of pollutant concentrations in São Paulo, Brazil, *Environmental Pollution*, 116: 257-263.
- Shahgedanova M., Burt T.P., Davies T.D. (1998) Synoptic Climatology of Air Pollution in Moscow. *Theoretical and Applied Climatology*, 61: 85-102.
- Sharma S. (1995) *Applied Multivariate Techniques*. John Wiley & Sons, New York, ISBN:978-0471310648, 512.

Stewart D.W. (1981) The application and Misapplication of Factor Analysis in Marketing Research. *Journal of Marketing Research*, 18: 51-62.

Sugar CA and James GM. (2003) Finding the Number of Clusters in Dataset. *Journal of the American Statistical Association*, 98: 750–763.

Well D.W. and Sheth N.J. (1971) Factor analysis in Marketing Research. Faculty Working Papers. College of Commerce and Business Administration.

World Health Organization, «Air Quality Guidelines», Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global Update 2005.

Yarnal B. (1993) Synoptic climatology in environmental analysis *Studies in Climatology Series*. London: Belhaven Press, 195pp.

Ziomas I.C., Melas D., Zerefos C.S., Bais A.F. (1995) On the relationship between peak ozone levels and meteorological variables. *Fresenius Environmental Bulletin*, 4: 53-58.

Ελληνική

Αλμπάνης Τ. (2009) Ρύπανση και τεχνολογίες προστασίας περιβάλλοντος, 316-320.

Καραλής Ι. (1969) Types of weather in Greece, 13-22.

Κουβαράκης Γ. (2002) Όζον και αιωρούμενα σωματίδια στην ανατολική Μεσόγειο.

Κουτούπα-Ρεγκάκου. (1995) Ν.1650/10.10.1986, άρθρο 2.

Μαλδογιάννης Θ. (1971) Το κλίμα των Ιωαννίνων, 7-8.

Μαχαίρας Π. (1982) Συνοπτικές καταστάσεις και πολυδιάστατη ανάλυση του καιρού στη Θεσσαλονίκη, Δημοσιεύματα Εργαστηρίου Κλιματολογίας Αθηνών, Αθήνα. σελ. 184.

Μουστρής Κ. (2009) Πρόγνωση ποιότητας της ατμόσφαιρας στην ευρύτερη περιοχή Αθηνών με τη χρήση νευρωνικών δικτύων. Διδακτορική Διατριβή (Ph.D), Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Σιντόση Ο.Α. (2000) Συμβολή στη μελέτη της σχέσεως των μετεωρολογικών παραμέτρων με τις συγκεντρώσεις ρύπων στην αστική περιοχή των Αθηνών, 20-23.

Τριανταφύλλου Α. (2004) Ατμοσφαιρική ρύπανση-Ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, Σύγχρονες Τεχνικές Μέτρησης, Κοζάνη.

Ιστοσελίδες

<http://www.airthess.gr/>

http://www.doyk.gr/vivliothiki/pdf/perivallon/atmo_rypani.pdf

<http://lap.physics.auth.gr/>

<http://www.eea.europa.eu/articles/air-quality-in-europe>

Bristol City Council Air Quality. Local Air Quality and Emissions Available at:
<http://www.bristol.airqualitydata.com>

Βρυξέλλες, 1η Φεβρουαρίου 2010

<http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/10/112&format=HTML&aged=0&language=EL&guiLanguage=en>

Οδηγία 2008/50/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβούλιου

<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:152:0001:0044:EL:PDF>

<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>