



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
<<ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ>>

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΧΩΡΙΚΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ, ΤΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ
ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΚΡΑΙΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΟΥ ΥΕΤΟΥ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ
ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 1950-2024 ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
ΕΠΑΝΑΝΑΛΥΣΗΣ ERA5-LAND

ΑΝΥΦΑΝΤΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

A.M.: 854

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΑΓΓΕΛΙΚΗ ΦΩΤΙΑΔΗ

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2026

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
ABSTRACT.....	8
ΛΙΣΤΑ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1.1 Γενικά.....	10
1.2 Μεσόγειος.....	10
1.3 Περί Ελλαδικού χώρου.....	12
1.4 Τροπόσφαιρα.....	14
1.5 Γενική Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία.....	16
1.5.1 Κλίμακες της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας.....	16
1.5.2 Η ατμοσφαιρική κυκλοφορία των τριών κυττάρων.....	17
1.5.3 Η προέλευση των βαρομετρικών συστημάτων από τα δυτικά.....	19
1.6 Η Κύμανση του Βορείου Ατλαντικού	20
1.7 Νέφη.....	22
1.7.1 Είδη νεφών.....	22
1.7.2 Μηχανισμοί δημιουργίας νεφών.....	25
1.8 Μέτωπα και Βαρομετρικά συστήματα.....	27
1.9 Υετός.....	32
1.9.1 Χιόνι.....	33
1.9.2 Βροχή.....	35
1.9.3 Χαλάζι.....	36
1.10 Σκοπός της Εργασίας.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΕΔΟΜΕΝΑ-ΜΕΘΟΛΟΓΙΑ.....	39
2.1 Περιοχή Μελέτης.....	39
2.2 Δεδομένα.....	40
2.3 Σύγκριση δεδομένων επανανάλυσης με μετρήσεις σταθμών.....	40
2.4 Μεθοδολογία.....	45
2.4.1 Παραγοντική Ανάλυση.....	45

2.4.2 Τμηματική Παλινδρόμηση.....	47
2.4.3 Mann-Kendall Test.....	48
2.4.4 Theil-Shen Estimator.....	49
2.4.5 Δείκτες για την ανάλυση των ακραίων φαινομένων υετού	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	52
3.1 Η χρονική εξέλιξη του υετού στην Ελλάδα για τη χρονική περίοδο μελέτης.....	52
3.1.1 Χωρική κατανομή του υετού.....	53
3.1.2 Διερεύνηση της διαχρονικής μεταβολής του υετού.....	55
3.1.3 Προσδιορισμός των κύριων προτύπων διαχρονικής διακύμανσης του υετού	56
3.1.4 Προσδιορισμός χρονικών σημείων καμπής.....	60
3.1.5 Ανάλυση ανά 25ετία.....	62
3.1.6 Ανάλυση ανά 10ετία.....	63
3.1.7 Εποχική Ανάλυση.....	65
3.1.8 Μηνιαία Ανάλυση.....	68
3.2 Τάσεις Υετού.....	72
3.2.1 Ανάλυση για όλη τη χρονική περίοδο.....	72
3.2.2 Ανάλυση ανά 25ετία.....	74
3.2.3 Ανάλυση ανά 10ετία.....	77
3.2.4 Εποχική ανάλυση.....	81
3.2.5 Μηνιαία ανάλυση.....	83
3.2.6 Ανάλυση σε υγρή και ξηρή περίοδο.....	85
3.3 Προσδιορισμός Επεισοδίων Ακραίου Υετού και Ανάλυση των Διαχρονικών Τάσεων Μεταβολής τους.....	88
3.3.1 Τάσεις του δείκτη R95pDays για όλη τη χρονική περίοδο μελέτης.....	92
3.3.2 Τάσεις του δείκτη R95pDays ανά 25ετία.....	94
3.3.3 Τάσεις του δείκτη R95pDays ανά 10ετία.....	96
3.3.4 Τάσεις του δείκτη R95p για όλη τη χρονική περίοδο μελέτης.....	98
3.3.5 Τάσεις του δείκτη R95p ανά 25ετία.....	100

3.3.6 Τάσεις του δείκτη R95p ανά 10ετία.....	102
3.3.7 Τάσεις του δείκτη R95pTOT για όλη τη χρονική περίοδο μελέτης.....	104
3.3.8 Τάσεις του δείκτη R95pTOT ανά 25ετία.....	107
3.3.9 Τάσεις του δείκτη R95pTOT ανά 10ετία.....	109
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	113
ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	115
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	116

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει τίτλο «Μελέτη των χωρικών προτύπων, των κλιματικών τάσεων και των ακραίων τιμών του νετού στον Ελλαδικό χώρο κατά την περίοδο 1950-2024 με τη χρήση δεδομένων επανανάλυσης ERA5-LAND». Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στο εργαστήριο Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, του τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Ατμοσφαιρικές Επιστήμες και Περιβάλλον». Την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας είχε αναλάβει η Επίκουρη Καθηγήτρια του τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, κα Αγγελική Φωτιάδη, την οποία ευχαριστώ για την άριστη συνεργασία που είχαμε. Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη ΔΕΠ τα οποία απαρτίζουν το συγκεκριμένο τομέα για την πολύτιμη μεταλαμπάδευση γνώσεων. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ηλία Χούσο και την κα Σόνια Μαλεφάκη για τη σημαντική τους συμβολή στην εργασία μου καθώς και όλους όσους με βοήθησαν και στάθηκαν δίπλα μου στο έργο αυτό.

Νικόλαος Ανυφαντής, Ιωάννινα 2026

Περίληψη

Η περιοχή της Μεσογείου έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα ευαίσθητη στην τρέχουσα κλιματική αλλαγή. Πέρα από τη συνεχιζόμενη αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία αναμένεται να συνεχιστεί με ρυθμούς υψηλότερους από τον παγκόσμιο μέσο όρο, έχει επίσης εντοπιστεί μια πτωτική τάση στον υετό, συνοδευόμενη από μετατόπιση προς ξηρότερες συνθήκες και με προβλέψεις για συχνότερες ξηρασίες. Εκτός από τις αλλαγές στις μέσες κλιματικές συνθήκες, η Μεσόγειος βιώνει ολοένα και συχνότερα ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως καύσωνες, έντονα επεισόδια υετού και ξηρασίες, των οποίων η συχνότητα και η ένταση αναμένεται να αυξηθούν σημαντικά. Ωστόσο, οι μεταβολές του υετού και των ακραίων φαινομένων, δεν είναι τόσο σαφείς και παρουσιάζουν μεγάλη χωρική ετερογένεια. Η πολύπλοκη τοπογραφία, η ισχυρή τοπική αλληλεπίδραση ξηράς-θάλασσας και η μεγάλη μεταξύ ετών μεταβλητότητα του μεσογειακού κλίματος αποτελούν τους κύριους παράγοντες που διαμορφώνουν τα ποικίλα χωρικά και χρονικά πρότυπα του υετού. Καθώς ο υετός διακατέχει σημαντικό ρόλο στη διαθεσιμότητα των υδάτινων πόρων, οι χωρικές και χρονικές μεταβολές του παρουσιάζουν σημαντικό περιβαλλοντικό και κοινωνικό ενδιαφέρον, ιδιαίτερα υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής. Η παρούσα μελέτη στοχεύει να εντοπίσει τις μεταβολές στα χωρικά και χρονικά πρότυπα του υετού στην Ελλάδα κατά τις τελευταίες δεκαετίες, να εντοπίσει ακραία φαινόμενα και να ερευνήσει τις στατιστικές τους ιδιότητες. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα επανάλυσης από το ERA5-Land του ECMWF, τα οποία αποτελούνται από ωριαίες τιμές αθροιστικού υετού, σε ανάλυση ($0.1^\circ \times 0.1^\circ$) πάνω από την Ελλάδα, για την περίοδο 1950–2024. Εξετάσθηκαν και συγκρίθηκαν μεταξύ τους τα χωρικά πρότυπα και η χρονική μεταβλητότητα του υετού για όλη τη χρονική περίοδο σε διάφορες χρονικές κλίμακες. Επιπλέον, υπολογίστηκαν τα ημερήσια κατώφλια ακραίου υετού και πραγματοποιήθηκε ανάλυση των ακραίων τιμών του με χρήση μη παραμετρικών στατιστικών μεθόδων. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν έντονη χωρική διαφοροποίηση του υετού με υψηλότερες τιμές στη δυτική Ελλάδα και χαμηλότερες στην ανατολική. Η χρονική εξέλιξη του υετού παρουσιάζει μη γραμμική συμπεριφορά, με εμφανή μείωση να παρατηρείται κατά τη δεκαετία του 1980 και στις αρχές της δεκαετίας του 1990, με μεταγενέστερη τάση ανάκαμψης κατά τις πρόσφατες δεκαετίες. Παράλληλα, παρατηρείται ενίσχυση του ακραίου υετού σε συγκεκριμένες περιοχές, τόσο ως προς τη συχνότητα όσο και ως προς την ένταση. Τα αποτελέσματα της μελέτης αποκαλύπτουν τις μεταβολές του υετού τόσο σε τοπική όσο και σε ευρύτερη χωρική κλίμακα, στα πλαίσια της κλιματικής αλλαγής, γεγονός ζωτικής σημασίας για την καλύτερη κατανόηση των μελλοντικών προβλέψεων και τη βελτίωση των δράσεων προσαρμογής και των στρατηγικών μετριασμού.

Abstract

The Mediterranean basin has been proven particularly sensitive to ongoing climate change. Beyond the amplified warming, that is expected to continue exceeding global rates, a decline trend in precipitation accompanied by a shift to drier conditions, has been also identified with projected trends towards increased droughts. Besides the changes in mean climate conditions, Mediterranean experiences more often extreme weather events, including heatwaves, heavy precipitation and droughts, the frequency and intensity of which are expected to significantly increase. However, precipitation changes and associated hydrological extremes, both wet and dry, are not so robust and certain and show great spatial heterogeneity. The complex topography, the strong local land–sea interactions and the large inter-annual variability of the Mediterranean climate are the main drivers of various spatial and temporal precipitation patterns. As precipitation is a key component of water resources and availability, its spatial and temporal changes are of considerable environmental and societal interest, particularly under climate change. The present study aims to reveal changes in spatial and temporal patterns of precipitation in Greece during the last decades, to identify extreme events and depict their statistical properties. To that end, hourly accumulated precipitation gridded ($0.1^\circ \times 0.1^\circ$) data, over Greece, for the period 1950 to 2024 are retrieved from the ECMWF ERA5-Land reanalysis dataset and then, statistically processed. The spatial patterns and temporal variability of precipitation are examined and compared for the entire study period, as well as for selected sub-periods. In addition, daily thresholds of extreme precipitation are calculated and extreme precipitation is analyzed using non-parametric statistical methods. The results reveal a pronounced spatial differentiation of precipitation, with higher values observed in western Greece and lower values in the eastern part of the country. The temporal evolution of precipitation exhibits a non-linear behavior, with a marked decrease during the 1980s and early 1990s, followed by a recovery trend in recent decades. Furthermore, an increase of extreme precipitation is observed in specific regions, both in terms of frequency and magnitude. The findings highlight the local and regional response of precipitation to climate change, providing valuable insights for improving future projections and supporting adaptation and mitigation strategies.

Λίστα Ακρωνυμίων

BIAS (MBE): Mean Bias Error

C3S: Copernicus Climate Change Service

ERA5: ECMWF Reanalysis 5th Generation

ECMWF: European Center of Medium-Range Weather Forecasts

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

ITCZ: Intertropical Convergence Zone

MAE: Mean Absolute Error

NAO: North Atlantic Oscillation

RMSE: Root Mean Square Error

WMO: World Meteorological Organization

Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Ο υετός αποτελεί μία από τις βασικότερες μετεωρολογικές παραμέτρους και περιλαμβάνει κάθε μορφή νερού, υγρού ή στερεού που κατακρημνίζεται από την ατμόσφαιρα προς την επιφάνεια της Γης, όπως η βροχή, το χιόνι, το χαλάζι και το χιονόνερο. Αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων, έχοντας έτσι σπουδαίο ρόλο στη γεωργία, τη λειτουργία των οικοσυστημάτων, την ενέργεια και επομένως για την ίδια τη ζωή. Οι μεταβολές στα πρότυπα του υετού μπορούν να έχουν σοβαρές επιπτώσεις, είτε μέσω παρατεταμένων ξηρών περιόδων είτε μέσω έντονων και ακραίων επεισοδίων υετού. Συνεπώς, η διερεύνηση των βασικών χαρακτηριστικών και των μεταβολών του υετού είναι μείζονος σημασίας για τον προσδιορισμό και την κατανόηση την χωρικής και χρονικής του συμπεριφοράς, ιδιαίτερα στα πλαίσια της κλιματικής αλλαγής.

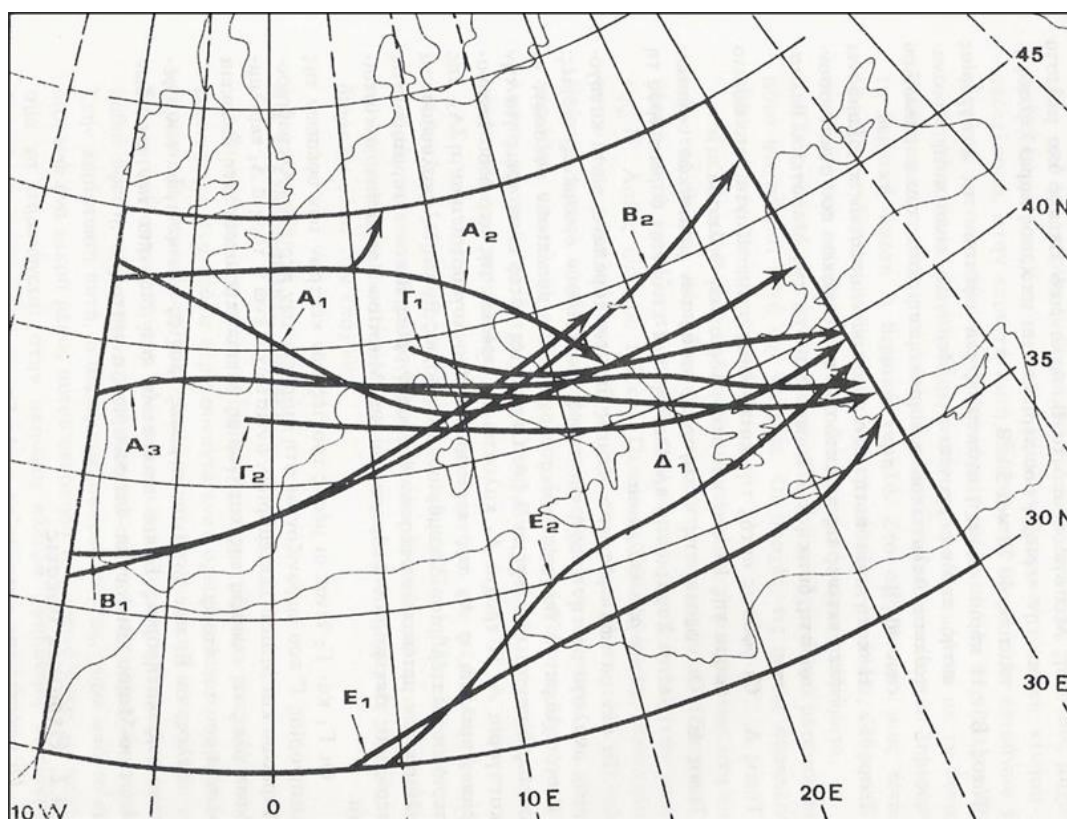
1.2 Η Μεσόγειος

Η περιοχή της Μεσογείου συγκαταλέγεται μεταξύ των σημαντικότερων “κλιματικών hot-spots” του πλανήτη, καθώς εμφανίζει εντονότερη θέρμανση σε σχέση με τον παγκόσμιο μέσο όρο, συνοδευόμενη από μείωση του υετού και αύξηση της συχνότητας εμφάνισης ξηρασιών (Todaro et al., 2022). Παράλληλα, η περιοχή εκδηλώνει ολοένα πιο συχνά έντονα ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως παρατεταμένους καύσωνες, επεισόδια έντονου υετού και παρατεταμένες ξηρές περιόδους (IPCC, 2021). Οι αλλαγές αυτές επηρεάζουν άμεσα την υδρολογική ισορροπία και τομείς όπως η γεωργία, η διαχείριση των υδάτων και η πολιτική προστασία.



Σχήμα 1.1 Γεωφυσικός χάρτης της Μεσογείου(Google Earth).

Το μεσογειακό κλίμα χαρακτηρίζεται από θερμά και ξηρά καλοκαίρια και από ήπιους και υγρούς χειμώνες, παρουσιάζοντας έντονη εποχικότητα στον υετό. Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά του είναι η σαφής διάκριση μεταξύ της ξηρής και της υγρής περιόδου, με τη δεύτερη να ταυτίζεται κυρίως με τη ψυχρή περίοδο του έτους (Seager, 2019). Το μεγαλύτερο ποσοστό του ετήσιου υετού καταγράφεται κατά την ψυχρή περίοδο, ενώ κατά τη θερμή περίοδο παρατηρούνται περιορισμένα ποσά υετού και παρατεταμένες ξηρές συνθήκες (Seager, 2019 ; Deitch et al., 2017). Η εποχική αυτή κατανομή συνδέεται άμεσα με την αυξημένη κυκλωνική δραστηριότητα στη λεκάνη της Μεσογείου κατά τους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες. Οι μετωπικές υφέσεις που σχηματίζονται ή διέρχονται από την περιοχή ακολουθούν συγκεκριμένες τροχιές, μεταφέροντας υγρές αέριες μάζες και προκαλώντας σημαντικά επεισόδια υετού. Οι κυριότερες τροχιές των μετωπικών υφέσεων στη Μεσόγειο παρουσιάζονται παρακάτω στο Σχήμα 1.2, όπου διακρίνεται πως οι τροχιές των μετωπικών υφέσεων συγκλίνουν κυρίως προς την κεντρική και ανατολική Μεσόγειο, επηρεάζοντας σημαντικά την κατανομή και την ένταση του υετού στις περιοχές αυτές.



Σχήμα 1.2 Κύριες τροχιές των μετωπικών υφέσεων στη Μεσόγειο (Φλόκας, 1994).

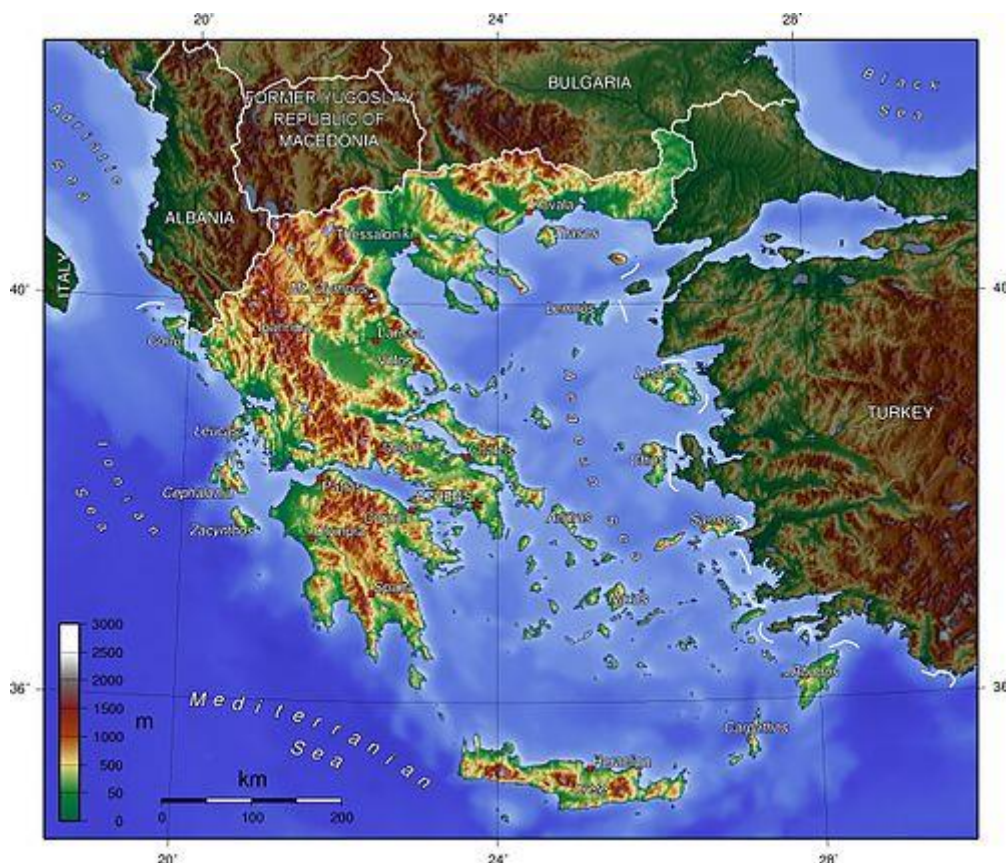
Η λεκάνη της Μεσογείου χαρακτηρίζεται από έντονη χωρική και χρονική μεταβλητότητα του υετού, αποτέλεσμα της γεωγραφικής της θέσης, του κλίματός της, της πολύπλοκης τοπογραφίας και της ισχυρής αλληλεπίδρασης ξηράς-θάλασσας. Υπό το καθεστώς της κλιματικής αλλαγής, η περιοχή θεωρείται ιδιαίτερα ευάλωτη, καθώς αναμένεται να επηρεαστεί τόσο από μεταβολές στον υετό όσο και από αλλαγές στη συχνότητα και ένταση των ακραίων φαινομένων του (IPCC, 2021). Ωστόσο, οι παρατηρούμενες μεταβολές του υετού

στη Μεσόγειο δεν παρουσιάζουν ενιαία ή ομοιογενή συμπεριφορά, αλλά χαρακτηρίζονται από σημαντική χωρική ανομοιογένεια και μεταβλητότητα (Giorgi, 2006 ; Philandras et al., 2011). Παράλληλα, η μεταβλητότητα του νετού της περιοχής επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την μεγάλης κλίμακας ατμοσφαιρική κυκλοφορία, με τη Βορειοατλαντική Ταλάντωση (North Atlantic Oscillation, NAO) να παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση υγρών και ξηρών περιόδων, ανάλογα αν η κύμανση βρίσκεται στην αρνητική ή θετική της φάση (Hatzianastassiou et al., 2016). Η σημασία της χωρικά εκτεταμένης και μακροχρόνιας ανάλυσης του νετού στη Μεσόγειο έχει αναδειχθεί και από μελέτες, οι οποίες επιβεβαιώνουν την ύπαρξη έντονων χωρικών αντιθέσεων και μη γραμμικών μεταβολών στον νετό της περιοχής (Deitch et al., 2017 ; González-Hidalgo and Vicente-Serrano, 2025).

Συνολικά, τα διαθέσιμα στοιχεία συγκλίνουν στο ότι η Μεσόγειος βρίσκεται στον πυρήνα της παγκόσμιας κλιματικής μεταβολής. Η αύξηση της θερμοκρασίας, η μείωση του νετού και η αλλαγή στη συχνότητα και ένταση των ακραίων φαινομένων καθιστούν την περιοχή εξαιρετικά ευάλωτη και ταυτόχρονα προτεραιότητα για την διεθνή κοινότητα με αντικείμενο την έρευνα του κλίματος. Σε αυτό το πλαίσιο, η παρακολούθηση και η ανάλυση μακροχρόνιων χρονοσειρών νετού, ιδιαίτερα με σύγχρονα δεδομένα επανανάλυσης υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης, όπως η βάση δεδομένων ERA5-Land, αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για την κατανόηση των εξελισσόμενων κλιματικών αλλαγών.

1.3 Περί Ελλαδικού χώρου

Η Ελλάδα αποτελεί μια χαρακτηριστική περίπτωση μεσογειακής χώρας, όπου πέραν της γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας, η οποία καθορίζει την υφιστάμενη δραστηριότητα και τις τροχιές των υφέσεων, το καθεστώς του νετού σε περιοχική και τοπική κλίμακα, διαμορφώνεται από τη συνύπαρξη έντονων τοπογραφικών βαθμίδων και εκτεταμένης ακτογραμμής υπό την έννοια της έντονης παρουσίας της θάλασσας. Το ανάγλυφο της χώρας, με την παρουσία ορεινών όγκων που εκτείνονται κυρίως κατά τον άξονα βορρά–νότου, σε συνδυασμό με την εγγύτητα στη θάλασσα, οδηγεί σε έντονη χωρική διαφοροποίηση του νετού, τόσο ως προς τα ετήσια ύψη όσο και ως προς τη συχνότητα και την ένταση των επεισοδίων νετού.



Σχήμα 1.3 Ο γεωφυσικός χάρτης της Ελλάδας(www.wikipedia.org).

Η χωρική κατανομή του υετού στην Ελλάδα παρουσιάζει σαφή δυτικό-ανατολική βαθμίδα, με τις δυτικές περιοχές (ομβροπλευρές) να δέχονται σημαντικά υψηλότερα ετήσια ύψη υετού σε σύγκριση με τις ανατολικές και νοτιοανατολικές περιοχές (Markonis et al., 2016). Η διαφοροποίηση αυτή αποδίδεται κυρίως στην ορεογραφία, καθώς οι δυτικοί άνεμοι οι οποίοι μεταφέρουν υγρές αέριες μάζες γενικότερα από τη Μεσόγειο και ειδικότερα από το Ιόνιο Πέλαγος, εναποθέτουν τον υετό στην προσήνεμη πλευρά των ορεινών όγκων (π.χ. της οροσειράς της Πίνδου). Παράλληλα, τα νησιωτικά συμπλέγματα εμφανίζουν ιδιαίτερη συμπεριφορά ως προς τον υετό, με τα νησιά του Ιονίου να συγκαταλέγονται στις πιο υγρές περιοχές της χώρας, ενώ το Αιγαίο και ειδικότερα το νότιο τμήμα του, χαρακτηρίζεται από τα χαμηλότερα ετήσια ύψη υετού (Feidas et al., 2007).

Σε εποχική κλίμακα, ο υετός στην Ελλάδα εμφανίζει έντονη χειμερινή κυριαρχία, καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό του ετήσιου υετού σημειώνεται κατά τους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες, όταν η χώρα επηρεάζεται συχνότερα από βαρομετρικά χαμηλά και μετωπικά συστήματα. Αντίθετα, το καλοκαίρι, με την επικράτηση ισχυρής αντικυκλωνικής κυκλοφορίας πάνω από τη Μεσόγειο, χαρακτηρίζεται από παρατεταμένες ξηρές περιόδους, με εξαίρεση τα επεισόδια θερμικής αστάθειας και τοπικών καταιγίδων κυρίως σε ορεινές περιοχές της ηπειρωτικής χώρας. Η Ελλάδα, βρισκόμενη στην περιοχή της Μεσογείου, είναι ευαίσθητη σε μεταβολές τις γενικής κυκλοφορίας που μπορούν να επηρεάσουν άμεσα και σημαντικά το ύψος και τη συχνότητα του ετήσιου υετού. (Feidas et al., 2007 ; Nastos and Zerefos, 2010).

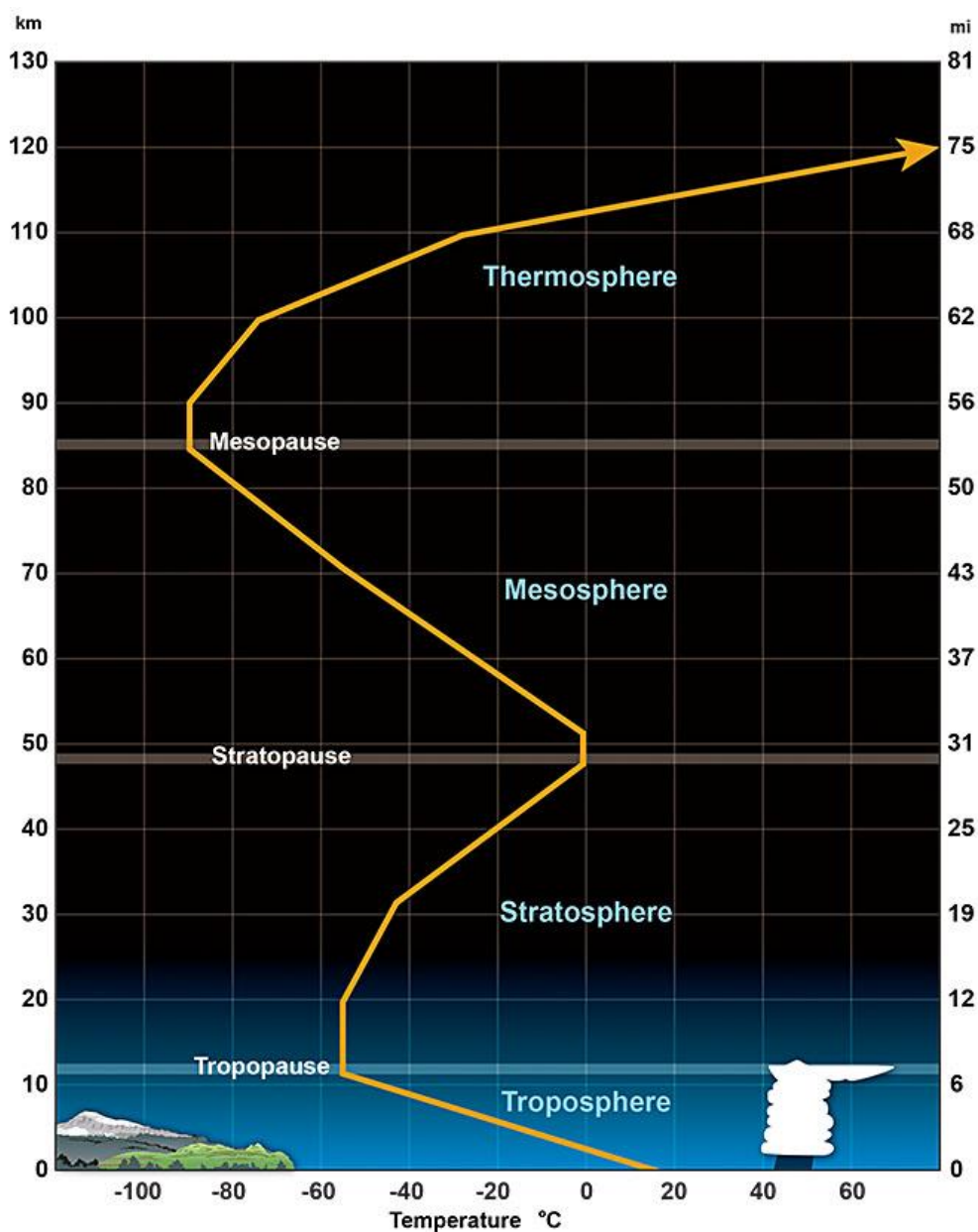
Ιδιαίτερη σημασία για την διαχρονική μεταβολή του υετού στην Ελλάδα έχει και η επίδραση των μεγάλων κλιματικών ταλαντώσεων. Συγκεκριμένα, η ταλάντωση του Βορείου Ατλαντικού (NAO)(Hurrell, 1995), έχει αναγνωριστεί ως ένας από τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν την από έτος σε έτος διακύμανση του χειμερινού υετού, με την εκδήλωση της θετικής φάσης του NAO να συνδέεται γενικά με ξηρότερες, του κανονικού, συνθήκες και την αρνητική φάση με αυξημένο (σε σχέση με το μέσο όρο) υετό, ιδίως στη δυτική και βόρεια Ελλάδα (Maheras & Anagnostopoulou, 2003 ; Hatzianastassiou et al., 2008).

Πολλές μελέτες που βασίζονται κυρίως σε επίγειες μετρήσεις έχουν καταδείξει ότι ο υετός στην Ελλάδα παρουσιάζει σημαντική διαχρονική μεταβλητότητα(Nastos & Zerefos, 2010 ; Pnevmatikos & Katsoulis, 2006). Ωστόσο, τα αποτελέσματα σχετικά με τις μακροχρόνιες τάσεις δεν είναι ομοιογενή, καθώς παρατηρούνται διαφοροποιήσεις τόσο ως προς το πρόσημο όσο και ως προς τη στατιστική σημαντικότητα των τάσεων, ανάλογα με την περίοδο μελέτης, την περιοχή και τη χρονική κλίμακα ανάλυσης. Σε αρκετές περιπτώσεις, ασθενείς ή μη στατιστικά σημαντικές ετήσιες τάσεις συνυπάρχουν με πιο σαφείς εποχικές μεταβολές, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία της ανάλυσης σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες (Philandras et al., 2011 ; Varlas et al., 2022).

Τα παραπάνω αναδεικνύουν ότι η Ελλάδα συνιστά μια περιοχή όπου οι μεταβολές στον υετό δεν μπορούν να περιγραφούν επαρκώς μέσω απλών χωρικών μέσων ή γραμμικών τάσεων. Αντιθέτως, απαιτείται η χρήση χωρικά εκτεταμένων και χρονικά συνεπών δεδομένων, όπως του ERA5-Land, όπου τα δεδομένα παρέχονται σε πλήρη χωρική κάλυψη ανά περιοχή με πλήρεις χρονοσειρές. Επίσης, είναι αναγκαία και η ανάλυση σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες, προκειμένου να αποτυπωθούν τόσο οι μέσες συνθήκες υετού όσο και οι ακραίες εκδηλώσεις και οι πιθανές μακροχρόνιες μεταβολές του καθεστώτος του υετού στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής.

1.4 Τροπόςφαιρα

Η ατμόσφαιρα της Γης παρουσιάζει έντονη κατακόρυφη διαφοροποίηση ως προς τη θερμοκρασία, την πυκνότητα, τη σύσταση και τη δυναμική της, διακρίνοντάς την έτσι σε επιμέρους στρώματα. Η διαίρεση της ατμόσφαιρας σε στρώματα βασίζεται κυρίως στη μεταβολή της θερμοκρασίας με το ύψος διαχωρίζοντας τις κυρίαρχες φυσικές διεργασίες σε κάθε επίπεδο.



Σχήμα 1.4 Κατακόρυφη διαίρεση της ατμόσφαιρας της Γης βάσει του κατακόρυφου προφίλ της θερμοκρασίας (www.noaa.gov).

Τροπόσφαιρα

Η τροπόσφαιρα αποτελεί το κατώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας. Εκτείνεται από την επιφάνεια της Γης έως το ύψος της τροπόπαυσης, περίπου στα 8–10 km στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, στα 16–18 km στις τροπικές περιοχές και στα 11–12 km στα μέσα γεωγραφικά πλάτη όπου ανήκει και η Ελλάδα, λαμβάνοντας υπόψιν τις εποχικές διακυμάνσεις.

Στην τροπόσφαιρα η θερμοκρασία μειώνεται με το ύψος. Στην επιφάνεια η μέση πλανητική θερμοκρασία είναι στους 15 °C ενώ στην κορυφή της τροπόσφαιρας στους -59 °C, δίνοντας έτσι ως μέση κατακόρυφη θερμοβαθμίδα περίπου τους 6.5 °C/km. Η συμπεριφορά

αυτή σχετίζεται με το γεγονός ότι η κατώτερη ατμόσφαιρα γενικά θερμαίνεται κυρίως από την επιφάνεια της γης και όχι απ' ευθείας από την ηλιακή ακτινοβολία.. Στην τροπόσφαιρα βρίσκεται περίπου το 80% της συνολικής μάζας της ατμόσφαιρας, λόγω της ικανότητας του αέρα να συμπιέζεται και περιέχεται σχεδόν το σύνολο των υδρατμών της ατμόσφαιρας. Η συντριπτική πλειοψηφία των καιρικών φαινομένων λαμβάνει χώρα σε αυτό το στρώμα.

1.5 Γενική Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία

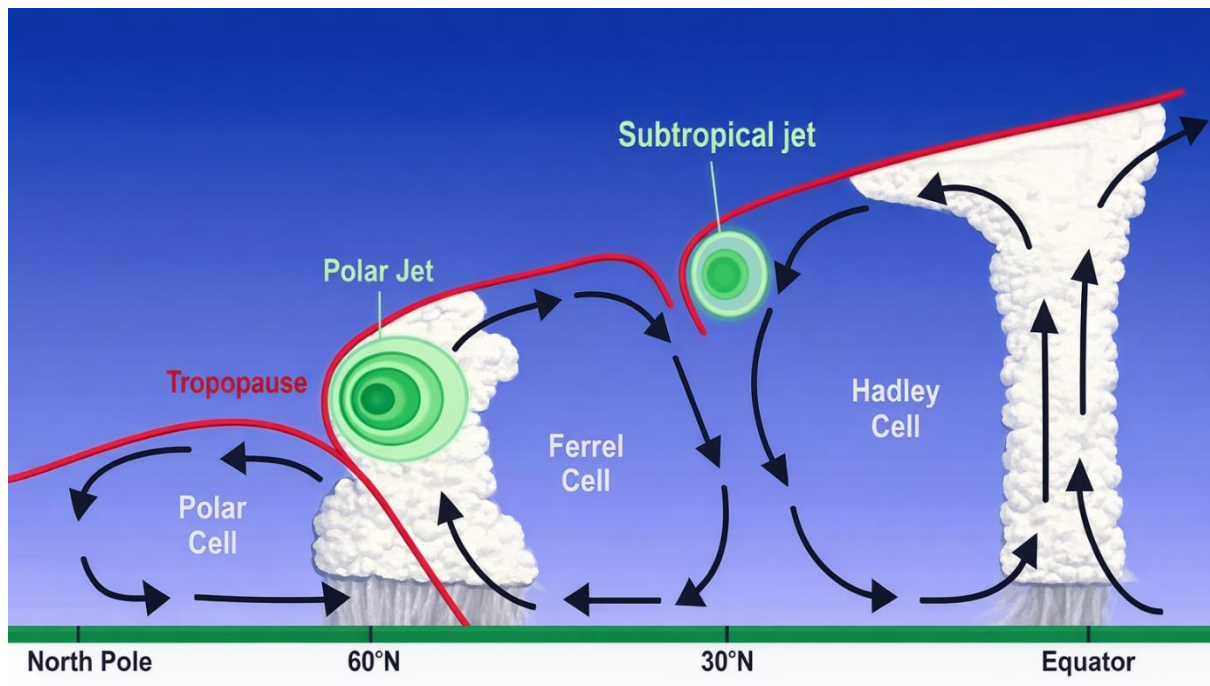
Η γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας περιγράφει τη μεγάλης κλίμακας κίνηση των αερίων μαζών στην τροπόσφαιρα. Η ατμόσφαιρα της γης εισέρχεται σε κίνηση λόγω της διαφορετικής θέρμανσης που παρατηρείται μεταξύ της περιοχής του Ισημερινού και των πολικών περιοχών του πλανήτη. Η διαδικασία αποκατάστασης της θερμικής ισορροπίας είναι συνεχής και πραγματοποιείται κυρίως με τη μεταφορά θερμών αερίων μαζών από τον Ισημερινό προς τους πόλους και ψυχρών αερίων μαζών από τους πόλους προς τον Ισημερινό. Μεταφορά θερμότητας από τις περιοχές μικρού γεωγραφικού πλάτους προς τις περιοχές μεγάλου γεωγραφικού πλάτους πραγματοποιείται και με την κυκλοφορία των ωκεανών μέσω των θαλάσσιων ρευμάτων. Λαμβάνοντας υπόψιν την αλληλεπίδραση του νερού των ωκεανών με τον αέρα της ατμόσφαιρας κάθε χρονική στιγμή και σε κάθε σημείο της υδάτινης επιφάνειας του πλανήτη, προκύπτει η αλληλεξάρτηση της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας και της κυκλοφορίας των ωκεανών. Ο όρος πλανητική κυκλοφορία αποκτά γενικότερη σημασία περιλαμβάνοντας την ατμοσφαιρική κυκλοφορία αλλά και την κυκλοφορία των ωκεανών (Ζιακόπουλος, 2008).

1.5.1 Κλίμακες της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας

Οι κλίμακες της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας χωρίζονται σε:

- πλανητικής κλίμακας κυκλοφορία που περιλαμβάνει κατά μέσο όρο 3 με 7 ατμοσφαιρικά κύματα σε κάθε ημισφαίριο. Τα κύματα αυτά είναι ορατά κάθε μέρα στους χάρτες της μέσης και της ανώτερης τροπόσφαιρας και είναι γνωστά ως μακρά κύματα ή κύματα Rossby ή πλανητικά κύματα
- μεγάλης κλίμακας κυκλοφορία, γνωστή ως κυκλοφορία συνοπτικής κλίμακας όπου περιλαμβάνει της μεγάλης κλίμακας κινήσεις του αέρα που παρατηρούνται στα βαρομετρικά συστήματα υψηλής και χαμηλής πίεσης και τα μέτωπα κακοκαιρίας
- μέσης κλίμακας κυκλοφορία, που είναι της τάξεως των λίγων χιλιομέτρων και περιλαμβάνει τους τοπικούς ανέμους που παρατηρούνται κοντά στις ακτές ή τα βουνά, τις καταιγίδες, τους σίφωνες και τις κινήσεις του αέρα στις αστικοποιημένες περιοχές
- μικρής κλίμακας κυκλοφορία, που είναι της τάξεως λίγων μέτρων και περιλαμβάνει μικρούς στροβίλους αέρα (δίνες) με μικρό χρόνο ζωής (Ζιακόπουλος, 2008).

1.5.2 Η ατμοσφαιρική κυκλοφορία των τριών κυττάρων



Σχήμα 1.5 Η ατμοσφαιρική κυκλοφορία των τριών κυττάρων (www.noaa.gov)

Η ατμοσφαιρική κυκλοφορία σε πλανητική κλίμακα περιγράφεται και αποτυπώνεται από το μοντέλο των τριών κυττάρων. Το πρώτο από αυτά είναι το κύτταρο κυκλοφορίας του Hadley, ένας κλειστός βρόγχος που ξεκινά από τον Ισημερινό με την ανύψωση του θερμού και υγρού αέρα και φθάνοντας στο ύψος της τροπόπαυσης, όπου αδυνατώντας να τη διαπεράσει, κατευθύνεται προς τους πόλους. Στην πορεία προς τους πόλους, ο αέρας ψύχεται λόγω εκπομπής ακτινοβολίας και πλησιάζοντας στα μέσα πλάτη, βυθίζεται στις περιοχές γεωγραφικού πλάτους περίπου 30°. Με τη βύθιση του αέρα, η ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια αυξάνει κατά μήκος δύο ζωνών, μία σε κάθε ημισφαίριο οι οποίες ονομάζονται υποτροπικές ζώνες υψηλών πιέσεων. Στον ξηρό αέρα που βυθίζεται οφείλονται οι υψηλές θερμοκρασίες και η ανομβρία που επικρατούν στις περιοχές της ξηράς που βρίσκονται στις υποτροπικές ζώνες υψηλών πιέσεων. Η έρημος Σαχάρα είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα περιοχής που ανήκει στην υποτροπική ζώνη υψηλών πιέσεων του βόρειου ημισφαιρίου. Ένα μέρος του αέρα που βυθίζεται στις περιοχές γεωγραφικού πλάτους 30°, φθάνοντας στην επιφάνεια, ρέει προς τον Ισημερινό με κατεύθυνση βορειοανατολική στο βόρειο ημισφαίριο και νοτιοανατολική στο νότιο ημισφαίριο, λόγω της επίδρασης της δύναμης Coriolis. Με αυτόν τον τρόπο, σχηματίζονται τα κύτταρα κυκλοφορίας του Handley.

Οι βορειοανατολικής διεύθυνσης αληγείς άνεμοι και οι νοτιοανατολικής ανταληγείς άνεμοι, που πνέουν στα μικρά γεωγραφικά πλάτη, δημιουργούν μια ζώνη σύγκλισης, που

ονομάζεται ενδοτροπική ζώνη σύγκλισης (ITCZ). Η σύγκλιση αυτή δε ταυτίζεται με το γεωγραφικό Ισημερινό, αλλά ακολουθεί το θερμικό Ισημερινό, που τα καλοκαίρια και τους χειμώνες μετακινείται στη διεύθυνση βορρά-νότου.

Το μέρος του θερμού αέρα, που μετά τη βύθισή του στις υποτροπικές περιοχές κατευθύνεται προς τους πόλους, συναντά σε κάποιο σημείο της διαδρομής του ψυχρές αέριες μάζες που προέρχονται από αυτούς. Αυτές οι δύο αέριες μάζες, με τα εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά, συναντώνται δημιουργώντας αυτό που στη Μετεωρολογία ονομάζεται πολικό μέτωπο σε γεωγραφικά πλάτη περίπου 60°. Κατά το μήκος του πολικού μετώπου, με τις συγκλίσεις και τις ανυψώσεις του αέρα, δημιουργούνται οι λεγόμενες μετωπικές υφέσεις (βαρομετρικά χαμηλά), που προκαλούν έντονα καιρικά φαινόμενα. Το δεύτερο κύτταρο, θα συμπληρωνόταν αν ένα μέρος του αέρα το οποίο ανυψώνεται στην περιοχή του πολικού μετώπου, επέστρεφε από τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας προς την περιοχή των υποτροπικών υψηλών πιέσεων με κατεύθυνση βορειοανατολική. Όμως αυτό δε συμβαίνει διότι στα μέσα πλάτη, οι ανώτεροι άνεμοι είναι κατά κανόνα δυτικοί. Άρα το δεύτερο κύτταρο κυκλοφορίας, που ονομάζεται κύτταρο κυκλοφορίας Ferrel, δεν αποτελεί έναν κλειστό βρόγχο.

Ο αέρας που ανυψώνεται στην περιοχή του πολικού μετώπου και κατευθύνεται προς τους πόλους, ψύχεται και βυθίζεται στις περιοχές των πόλων. Στη συνέχεια, ο ψυχρός αέρας, κινείται προς τις περιοχές μικρότερου γεωγραφικού πλάτους, κλείνοντας το τρίτο κύτταρο κυκλοφορίας που ονομάζεται πολικό κύτταρο κυκλοφορίας. Όπως και στην περίπτωση της βύθισης του αέρα στις υποτροπικές περιοχές, στις περιοχές των πόλων επικρατούν υψηλές πιέσεις. Στο πολικό κύτταρο κυκλοφορίας, όπως συμβαίνει και στην περίπτωση του κυττάρου Handley, το αίτιο δημιουργίας του είναι θερμικό. Η θέρμανση του αέρα στον Ισημερινό και η ανύψωσή του αντικαθίστανται από την ψύξη του αέρα πάνω από τους πόλους και τη βύθισή του.

Με βάση αυτά, το ημιτελές κύτταρο του Ferrel αποτελεί μια ενδιάμεση κυκλοφορία μεταξύ του κυττάρου Handley και του πολικού κυττάρου και δεν είναι τίποτα άλλο παρά ατμοσφαιρικά κύματα (κύματα αέρα) που δημιουργούνται με την εκροή ψυχρού αέρα από τους πόλους προς τις περιοχές με μικρότερα γεωγραφικά πλάτη και τη μεταφορά θερμού αέρα από τις υποτροπικές περιοχές προς τους πόλους. Το κύτταρο κυκλοφορίας του Ferrel αναφέρεται και ως ζώνη ανάμιξης (Ζιακόπουλος, 2008). Κύριο χαρακτηριστικό του είναι η επικράτηση Δυτικών ανέμων (westerlies) τόσο στην επιφάνεια όσο και στην ανώτερη τροπόσφαιρα. Ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς ενέργειας στο κύτταρο Ferrel δεν είναι η απλή θερμική κυκλοφορία, αλλά η δημιουργία και κίνηση, με γενική κατεύθυνση από δυτικά προς τα ανατολικά, συστημάτων χαμηλών πιέσεων γνωστών ως υφέσεις των μέσων γεωγραφικών πλατών.

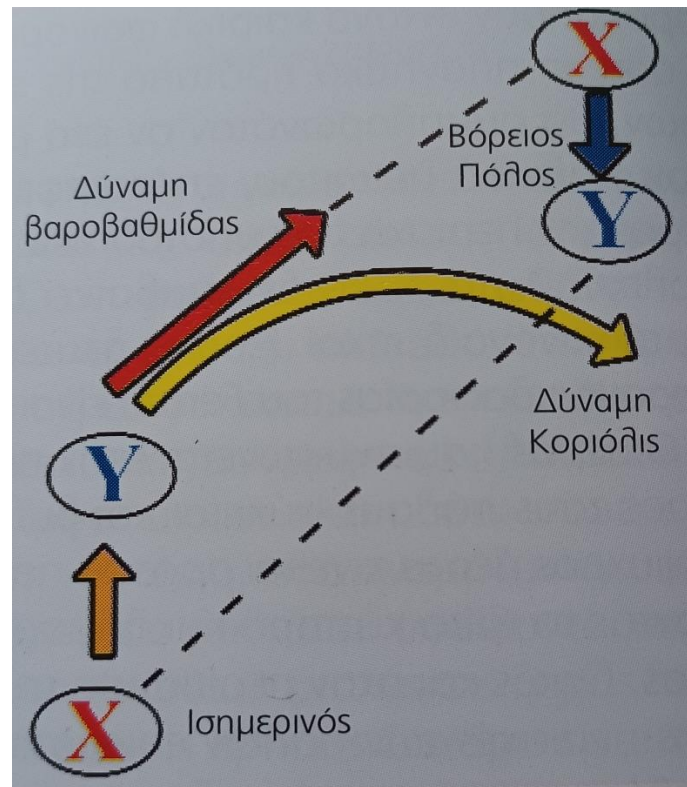
Ιδιαίτερο ρόλο στη δυναμική της τροπόσφαιρας έχουν οι αεροχείμαροι (jet streams), οι οποίοι εντοπίζονται κοντά στην τροπόπαυση και λειτουργούν ως οδηγοί της κίνησης των βαρομετρικών συστημάτων. Οι αεροχείμαρροι δημιουργούνται από την οριζόντια διαφορά πιέσεων και διαχωρίζονται στον πολικό αεροχείμαρρο που βρίσκεται σε ύψος περίπου 10 km

και γεωγραφικό πλάτος περίπου 60° και στον υποτροπικό αεροχείμματο ο οποίος βρίσκεται πάνω από τις περιοχές των υποτροπικών υψηλών πιέσεων ($\sim 30^\circ$ γεωγραφικό πλάτος) σε ύψος 13 km περίπου. Η θέση και η ένταση των αεροχειμμάτων (jet streams) επηρεάζουν άμεσα τη συχνότητα, την πορεία και την ένταση των συστημάτων υετού που φτάνουν στη Μεσόγειο. Μετατοπίσεις ή και ενίσχυση των αεροχειμμάτων μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένη κυκλογένεση και υετό αλλά και σε παρατεταμένες ξηρές περιόδους, ιδιαίτερα σε περιοχές μεταβατικής κυκλοφορίας όπως η Ελλάδα.

Η περιοχή της Μεσογείου και κατ' επέκταση η Ελλάδα βρίσκονται στο μεταβατικό όριο μεταξύ της καθοδικής ζώνης του κυττάρου Hadley και του πολικού μετώπου, μέσα στη ζώνη επιρροής του κυττάρου Ferrel. Η γεωγραφική αυτή θέση καθιστά την περιοχή ιδιαίτερα ευαίσθητη σε μεταβολές της γενικής κυκλοφορίας, καθώς μικρές αλλαγές στη θέση ή την ένταση των ζωνικών ρευμάτων μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές διαφοροποιήσεις στο καθεστώς του υετού. Ειδικότερα, κατά τη χειμερινή περίοδο, η Ελλάδα επηρεάζεται συχνά από τη διέλευση βαρομετρικών χαμηλών που κινούνται από τον Ατλαντικό προς την Ανατολική Μεσόγειο, προκαλώντας εκτεταμένα επεισόδια υετού.

1.5.3 Η προέλευση των βαρομετρικών συστημάτων από τα δυτικά

Στην ανώτερη ατμόσφαιρα ο θερμός αέρας συνδέεται με υψηλές πιέσεις και ο ψυχρός αέρας με χαμηλές πιέσεις. Έτσι, πάνω από τον Ισημερινό οι πιέσεις είναι υψηλές και πάνω από τους πόλους οι πιέσεις είναι χαμηλές. Αυτή η διαφορά πιέσεως (δύναμη βαροβαθμίδας), αναγκάζει τον αέρα να κινείται από τον Ισημερινό προς τους πόλους. Ο αέρας, κινούμενος προς τους πόλους, εκτρέπεται προς τα δεξιά στο βόρειο ημισφαίριο, λόγω της δύναμης Coriolis και αντιστοίχως προς τα αριστερά στο νότιο ημισφαίριο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στα ανώτερα στρώματα των μέσων πλατών να επικρατούν δυτικοί άνεμοι. Οι άνεμοι της ανώτερης τροπόσφαιρας των μέσων πλατών, πηδαλιουχούν τα επιφανειακά βαρομετρικά συστήματα (υψηλά ή χαμηλά) στη ζώνη μεταξύ των παραλλήλων 30° και 60° . Γι αυτό το λόγο, τα χαμηλά που επηρεάζουν την Ελλάδα συνήθως έρχονται από τα δυτικά (π.χ. την Ιταλία) (Ζιακόπουλος, 2008).



Σχήμα 1.6 Η εκτροπή του αέρα προς τα δεξιά λόγω επίδρασης της δύναμης Coriolis, δημιουργώντας στην ανώτερη ατμόσφαιρα των μέσων πλατών δυτικούς ανέμους (Ζιακόπουλος, 2008).

1.6 Η κύμανση του Βορείου Ατλαντικού (North Atlantic Oscillation)

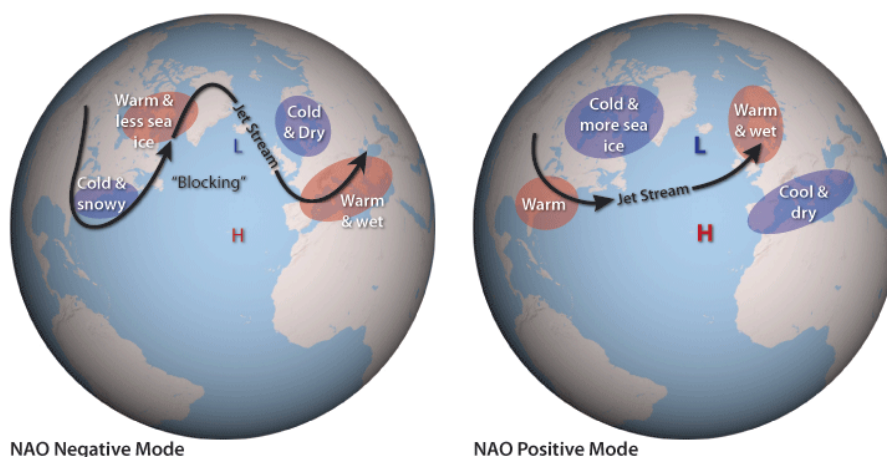
Η Κύμανση του Βορείου Ατλαντικού ή Βορειοατλαντική Ταλάντωση (North Atlantic Oscillation, NAO) είναι μια ταλάντωση της ατμοσφαιρικής πίεσης μεταξύ δύο μόνιμων βαρομετρικών συστημάτων: του βαρομετρικού χαμηλού της Ισλανδίας και του αντικυκλώνα των Αζορών. Η μεταβολή της βαροβαθμίδας μεταξύ αυτών των δύο σημείων καθορίζει τη φάση και την ένταση του NAO.

Η Βορειοατλαντική Ταλάντωση εκφράζεται συνήθως μέσω ενός δείκτη, ο οποίος βασίζεται στη διαφορά μεταξύ των κανονικοποιημένων τιμών της ατμοσφαιρικής πίεσης μεταξύ των περιοχών που αντιπροσωπεύουν τα δύο βαρομετρικά συστήματα. Οι περιοχές που συνήθως επιλέγονται είναι το Ρέικιαβικ της Ισλανδίας για το Ισλανδικό χαμηλό, και η Πόντα Ντελγκάντα (Ponta Delgada) στις Αζόρες ή η Λισαβόνα (Πορτογαλία) για τον υποτροπικό αντικυκλώνα. Η κύμανση NAO χαρακτηρίζεται από δύο κύριες φάσεις: τη θετική και την αρνητική φάση. Στη θετική φάση, η διαφορά πίεσης μεταξύ Ισλανδίας και Αζορών είναι ενισχυμένη (από το νότο προς τον βορρά) καθώς ο υποτροπικός αντικυκλώνας είναι πιο ισχυρός απ' ό,τι συνήθως (η πίεση είναι μεγαλύτερη από την μέση κλιματολογική τιμή) και το

ισλανδικό χαμηλό είναι βαθύτερο απ' ό τι συνήθως (η πίεση είναι μικρότερη από τη μέση κλιματολογική τιμή). Αυτή η αυξημένη διαφορά πίεσης οδηγεί σε ενίσχυση και μετατόπιση του πολικού αεροχείμματος προς τα βόρεια. Αντίθετα, κατά την αρνητική φάση, η διαφορά πίεσης είναι μικρότερη (ο υποτροπικός αντικυκλώνας είναι πιο ασθενής απ' ό τι συνήθως και το ισλανδικό χαμηλό είναι πιο ρηχό), με αποτέλεσμα ο αεροχείμμαρος να μετακινείται προς τη νότια Ευρώπη και τη Μεσόγειο.

Η επίδραση του NAO στις συνθήκες υετού της Ευρώπης αλλά και της ανατολικής ακτής της Βορείου Αμερικής, είναι ιδιαίτερα έντονη κατά τη χειμερινή περίοδο. Κατά τη θετική φάση της NAO, οι βόρειες και βορειοδυτικές περιοχές της Ευρώπης τείνουν να εμφανίζουν αυξημένο υετό, ενώ η νότια Ευρώπη και η Μεσόγειος βιώνουν ξηρότερες συνθήκες. Αντίθετα, κατά την αρνητική φάση του NAO, παρατηρείται συχνότερη διέλευση βαρομετρικών χαμηλών προς τη νότια Ευρώπη και τη Μεσόγειο, οδηγώντας σε αυξημένο υετό στις περιοχές αυτές, ενώ στη βόρεια Ευρώπη παρατηρούνται ψυχρές και συχνά ξηρές χειμερινές συνθήκες. Η αντίθετη αυτή συμπεριφορά υπογραμμίζει τον ρόλο της NAO στην ευρύτερη περιοχή ως βασικού ρυθμιστή του υετού, ιδιαίτερα κατά τη χειμερινή περίοδο (Rousi et al., 2020).

Στην Ελλάδα, η επίδραση του NAO εκδηλώνεται κυρίως μέσω της μεταβολής της συχνότητας εμφάνισης και των τροχιών που ακολουθούν τα βαρομετρικά συστήματα που επηρεάζουν την περιοχή. Περίοδοι (έτη) που αντιστοιχούν σε αρνητική φάση του NAO έχουν συσχετιστεί με αυξημένο υετό, ιδιαίτερα στη δυτική και βόρεια χώρα, ενώ περίοδοι που ταυτίζονται με την εκδήλωση θετικής φάσης συνδέονται συχνά με επικράτηση αντικυκλωνικών συνθηκών και μειωμένο υετό. Ωστόσο, η επίδραση του NAO δεν είναι χωρικά ομοιόμορφη, καθώς η τοπογραφία και η αλληλεπίδραση με άλλους παράγοντες ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, όπως τα συστήματα χαμηλών και υψηλών πιέσεων ή άλλες ταλαντώσεις, μπορούν να τροποποιήσουν τον υετό σε τοπικό επίπεδο (Hatzianastassiou et al., 2008; Kalimeris et al., 2017).



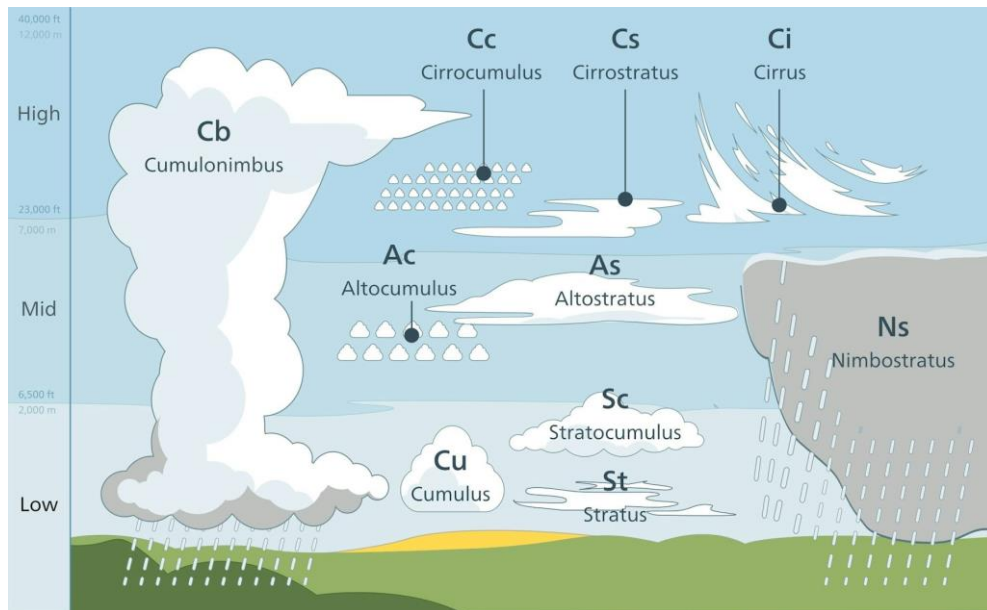
Σχήμα 1.7 Η Κύμανση του Βόρειου-Ατλαντικού στην αρνητική της φάση (αριστερά) και στη θετική της φάση (δεξιά). (www.climate.gov).

1.7 Νέφη

1.7.1 Είδη Νεφών

Τα νέφη μπορούν να έχουν διάφορα σχήματα και μεγέθη και μπορούν να σχηματίζονται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους αλλά και σε μεγάλο υψόμετρο. Τα περισσότερα είδη νεφών βρίσκονται στην τροπόσφαιρα, όμως κάποια μπορούν να παρατηρηθούν και στην στρατόσφαιρα, ακόμη και στη μεσόσφαιρα. Αποτελούνται από υδροσταγόνες ή και παγοκρυστάλλους, μπορεί να έχουν μεγάλο πάχος ή να είναι λεπτά και να έχουν μεγάλη ή μικρή συγκέντρωση υδροσταγόνων και παγοκρυστάλλων. Κάθε νέφος είναι διαφορετικό, για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητη η ταξινόμηση σύμφωνα με κάποια κοινά χαρακτηριστικά τους. Οι κατηγορίες των νεφών είναι:

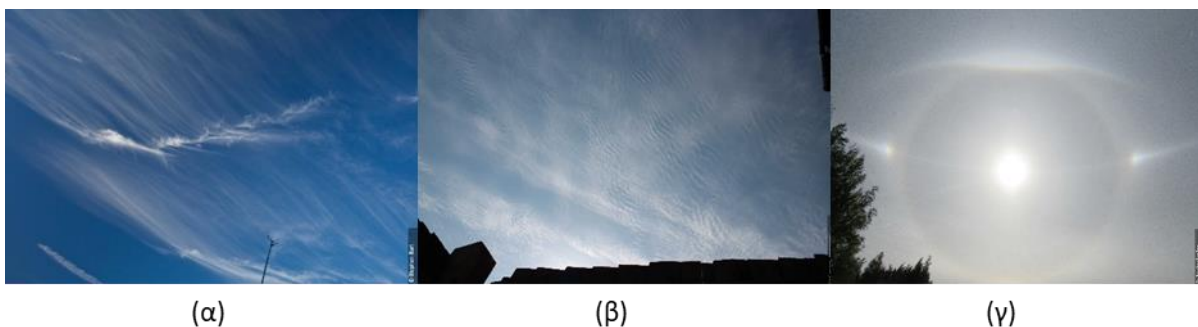
1. Υψηλά ή ανώτερα νέφη ($h > 6\text{km}$)
 - α) Θύσανοι (Cirrus, Ci)
 - β) Θυσανοσωρείτες (Cirrocumulus, Cc)
 - γ) Θυσανοστρώματα (Cirrostratus, Cs)
2. Μεσαία νέφη ($2\text{km} < h < 6\text{km}$)
 - α) Υψισωρείτες (Alto cumulus, Ac)
 - β) Υψιστρώματα (Altostratus, As)
3. Χαμηλά ή κατώτερα νέφη ($h < 2\text{km}$)
 - α) Στρώματα (Stratus, St)
 - β) Στρωματοσωρείτες (Stratocumulus, Sc)
 - γ) Μελανοστρώματα (Nimbostratus, Ns)
4. Νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης
 - α) Σωρείτες (Cumulus, Cu)
 - β) Σωρειτομελανίες (Cumulonimbus, Cb)



Σχήμα 1.8 Κατηγορίες νεφών(www.sciencelearn.org).

Ανώτερα νέφη

Η βάση των νεφών που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία βρίσκεται σε ύψος μεγαλύτερο των 6 km. Σε αυτό το ύψους, ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι αρκετά ξηρός και ψυχρός, οπότε τα ανώτερα νέφη αποτελούνται σχεδόν εξ ολοκλήρου από παγοκρυστάλλους και όχι από υδροσταγόνες. Η θερμοκρασία στην τροπόσφαιρα μειώνεται από τους 15 °C που είναι, κατά μέσο όρο, στην επιφάνεια με ρυθμό 6,5 °C ανά χιλιόμετρο. Επομένως, η μέση θερμοκρασία των υψηλών νεφών δεν ξεπερνά τους -35 °C. Η ψύξη ως το σημείο παγετού οδηγεί στο σχηματισμό παγοκρυστάλλων αντί υδροσταγόνων σε υπέρτηξη. Υπό την προϋπόθεση ότι η θερμοκρασία κοντά στην επιφάνεια να είναι πολύ χαμηλή, τα νέφη τα οποία αποτελούνται από παγοκρυστάλλους μπορούν να σχηματιστούν και σε χαμηλότερο ύψος. Συνεπώς, ο καθορισμός των ανώτερων νεφών εξαρτάται κατά κάποιο τρόπο από θερμοκρασία (Aguado and Burt, 2013). Η παρουσία υψηλών νεφών δεν συνδέεται με την πρόκληση υετού. Συχνά όμως, αποτελούν πρόδρομη ένδειξη της έλευσης μιας ατμοσφαιρικής διαταραχής (π.χ. ύφεση) που συνοδεύεται από την εκδήλωση υετού.



Σχήμα 1.9 Υψηλά νέφη: (α) Θύσανοι (Ci), (β) Θυσανωσωρείτες (Cc), (γ) Θυσανωστρώματα (Cs) (www.cloudatlas.wmo.int).

Μεσαία νέφη

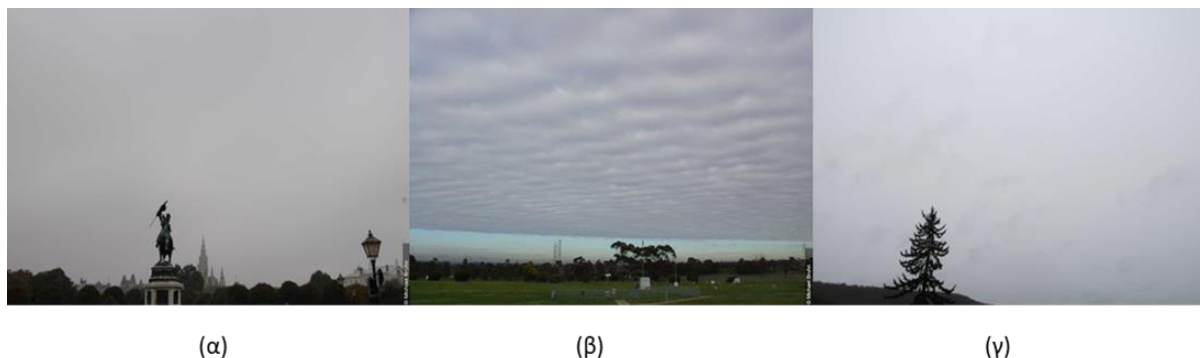
Τα νέφη αυτά έχουν μέσο ελάχιστο ύψος 2 km και μέσο μέγιστο ύψος τα 6 km. Αποτελούνται από υδροσταγονίδια ή από παγοκρυστάλλους όταν η θερμοκρασία είναι αρνητική. Τα ονόματα των νεφών που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία ξεκινούν με το πρόθεμα «ύψι-». Από αυτά, τα υψιστρώματα (As) είναι νέφη που συνδέονται με την εκδήλωση παρατεταμένης βροχόπτωσης ή χιονιού (ανάλογα με την επικρατούσα θερμοκρασία).



Σχήμα 1.10 Μέσα νέφη: Υψισωρείτες (Ac), (β) Υψιστρώματα (As) (www.cloudatlas.wmo.int).

Χαμηλά νέφη

Τα νέφη που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία έχουν τη βάση τους κάτω από τα 2.000m. Τα νέφη τύπου στρωματοσωρείτες (Sc), ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες, μπορούν να δώσουν βροχόπτωση ή χιονόπτωση ασθενούς έντασης. Τα πιο βροχοφόρα νέφη είναι τα Μελανοστρώματα (Ns) και η βροχή που δίνουν έχει μικρή ένταση αλλά μεγάλη διάρκεια.



Σχήμα 1.11 Χαμηλά νέφη: (α) Στρώματα (St), (β) Στρωματοσωρείτες (Sc), (γ) Μελανοστρώματα (Ns) (www.cloudatlas.wmo.int).

Νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης

Τα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης σχηματίζονται όταν επικρατούν συνθήκες απόλυτης αστάθειας ή αστάθειας υπό όρους, και είναι αποτέλεσμα έντονων ανοδικών κινήσεων του ατμοσφαιρικού αέρα. Κατακόρυφες κινήσεις που αναπτύσσονται μέσα στα ίδια τα νέφη, έχουν ταχύτητα της τάξης των μερικών m s^{-1} , οι οποίες σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να ξεπεράσουν και τα 50 m s^{-1} . Δηλαδή, οι κατακόρυφες κινήσεις στα νέφη αυτής της κατηγορίας μπορούν να είναι πιο έντονες και από τον άνεμο στην περίπτωση ενός ασθενούς τροπικού κυκλώνα. Επιπλέον, είναι πολύ πλούσια σε υδροσταγονίδια, τα οποία αρκετές φορές είναι περισσότερα από ό,τι στα στρωματομορφα νέφη.

Το σημαντικότερο είδος νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης είναι οι Σωρειτομελανίες (Cumulonimbus – Cb), τα οποία αποτελούν καταιγιδοφόρα νέφη και συνδέονται με έντονα καιρικά φαινόμενα, όπως ισχυρές βροχοπτώσεις, ηλεκτρικές εκκενώσεις, χαλαζοπτώσεις και ισχυρούς ανέμους. Τα νέφη αυτά αναπτύσσονται κυρίως υπό συνθήκες έντονης ατμοσφαιρικής αστάθειας και συνδέονται συχνά με τις θερμικές καταιγίδες της θερμής περιόδου, οι οποίες προκαλούνται από την ισχυρή θέρμανση της επιφάνειας του εδάφους και τις επακόλουθες έντονες ανοδικές κινήσεις του αέρα.



Σχήμα 1.12 Νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης: (α) Σωρείτες, (β) Σωρειτομελανίες (www.cloudatlas.wmo.int).

1.7.2 Μηχανισμοί δημιουργίας νεφών

Ο σχηματισμός των νεφών είναι αποτέλεσμα της ανύψωσης υγρού αέρα και της επακόλουθης ψύξης του έως το σημείο κορεσμού, οδηγώντας σε συμπύκνωση των υδρατμών σε υδροσταγόνες ή παγοκρυστάλλους. Οι διεργασίες αυτές συμβαίνουν σχεδόν αποκλειστικά στην τροπόσφαιρα και συνδέονται με τη θερμοδυναμική δομή της ατμόσφαιρας, τη διαθεσιμότητα υγρασίας και τους μηχανισμούς κατακόρυφης ανύψωσης του αέρα.

Η δημιουργία νεφών προϋποθέτει την παρουσία πυρήνων συμπύκνωσης, πάνω στους οποίους οι υδρατμοί μπορούν να μεταβούν από την αέρια στη υγρή ή στερεή φάση. Καθώς ο

αέρας ανυψώνεται, διαστέλλεται και ψύχεται αδιαβατικά, με αποτέλεσμα τη μείωση της ικανότητάς του να συγκρατεί υδρατμούς. Όταν επιτευχθεί κορεσμός, ξεκινά η διαδικασία σχηματισμού νεφών, με τα χαρακτηριστικά τους να εξαρτώνται από το ύψος, τη θερμοκρασία και τη δυναμική του περιβάλλοντος.

Οι μηχανισμοί ανύψωσης του αέρα που οδηγούν στη δημιουργία νεφών και επομένως και υετού ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες, μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες:

Θερμική ανύψωση

Η θερμική ανύψωση παρατηρείται όταν η επιφάνεια της Γης θερμαίνεται σημαντικά αλλά ανομοιόμορφα, λόγω της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, προκαλώντας θέρμανση του περεδάφιου στρώματος αέρα. Η επαγόμενη ελεύθερη κατακόρυφη μεταφορά (convection) των θερμότερων και ελαφρύτερων αερίων μαζών οδηγεί στο σχηματισμό νεφών. Ο μηχανισμός αυτός ευνοεί κυρίως τον σχηματισμό νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης, όπως οι σωρείτες, οι οποίοι μπορούν να εξελιχθούν σε σωρειτομελανίες υπό συνθήκες ατμοσφαιρικής αστάθειας.

Μηχανική ή ορογραφική ανύψωση

Η μηχανική ή ορογραφική ανύψωση προκαλείται όταν μια αέρια μάζα εξαναγκάζεται σε ανύψωση λόγω της παρουσίας ορεινών όγκων. Κατά την άνοδο, ο αέρας ψύχεται και μπορεί να οδηγήσει στον σχηματισμό νεφών. Ο μηχανισμός αυτός είναι ιδιαίτερα σημαντικός σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο όπως η Ελλάδα και συμβάλλει στη χωρική διαφοροποίηση του υετού.

Ανύψωση λόγω σύγκλισης κοντά στην επιφάνεια

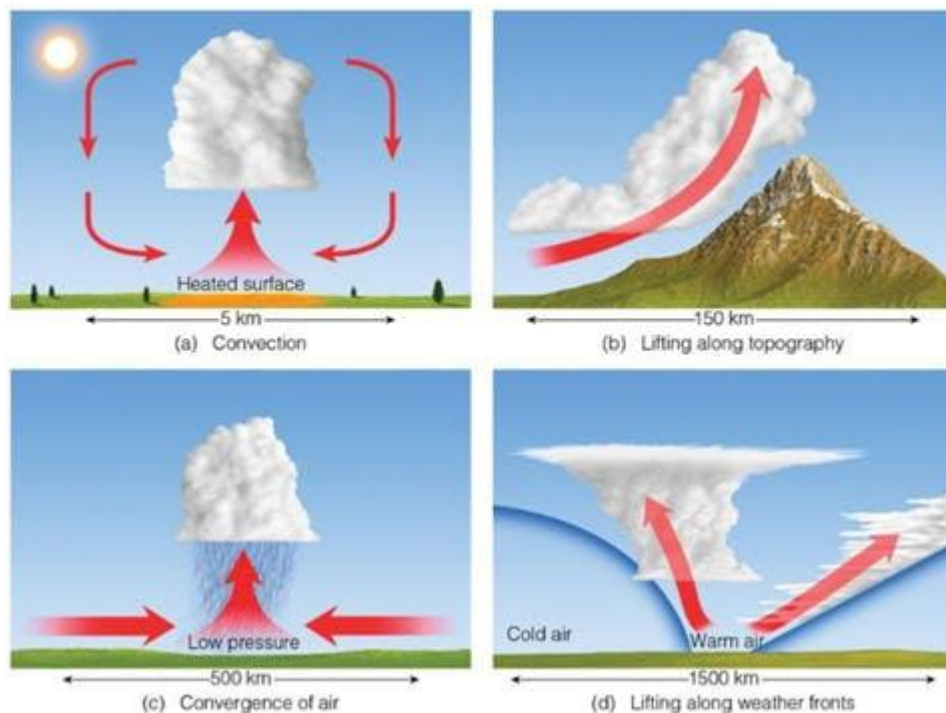
Η δημιουργία νεφών λόγω σύγκλισης (convergence) αποτελεί συνέπεια της αρχής διατήρησης της μάζας σε ένα συμπιεστό ρευστό. Όταν παρατηρείται οριζόντια εισροή (σύγκλιση) αερίων μαζών σε μια περιοχή κοντά στην επιφάνεια, η συσσωρευμένη μάζα αναγκάζεται σε κατακόρυφη ανύψωση καθώς το έδαφος λειτουργεί ως αδιαπέραστο όριο (οριακή συνθήκη μηδενικής ταχύτητας). Παράδειγμα λειτουργίας αυτού του μηχανισμού αποτελούν τα κέντρα των συστημάτων χαμηλών πιέσεων (υφέσεων) όπου η τριβή στην επιφάνεια ενισχύει τη σύγκλιση, η Ενδοτροπική Ζώνη Σύγκλισης όπου οι ΒΑ και ΝΑ αληγείς άνεμοι από τα δύο ημισφαίρια συγκλίνουν και σε μικρότερη κλίμακα η διείσδυση του μετώπου της θαλάσσιας αύρας στην ξηρά.

Ανύψωση κατά μήκος μετωπικών επιφανειών

Ένας ακόμη σημαντικός μηχανισμός είναι η μετωπική ανύψωση, η οποία συμβαίνει κατά τη συνάντηση θερμών και ψυχρών αερίων μαζών. Στα θερμά μέτωπα, η σταδιακή ανύψωση του θερμού αέρα πάνω από τον ψυχρό οδηγεί συνήθως στη δημιουργία εκτεταμένων στρωματόμορφων νεφών, τα οποία συνδέονται με υετό διάρκειας, συνήθως έως μέτριας

έντασης. Αντίθετα, στα ψυχρά μέτωπα, η απότομη ανύψωση του θερμού αέρα ευνοεί την ανάπτυξη νεφών έντονης κατακόρυφης ανάπτυξης, κυρίως σωρειτομελανιών, τα οποία προκαλούν μικρότερης διάρκειας αλλά έντονα επεισόδια νετού.

Στην περίπτωση διέλευσης ενός μετώπου με βαρομετρικό χαμηλό και ανώτερα ατμοσφαιρικά συστήματα, μπορεί να οδηγήσει στον σχηματισμό εκτεταμένων νεφών σε μεγάλες περιοχές. Η μορφή και η κατανομή των νεφών σε αυτή την περίπτωση εξαρτώνται από τη θέση και την ένταση των ατμοσφαιρικών διαταραχών, καθώς και από τη διαθεσιμότητα υγρασίας στην τροπόσφαιρα.



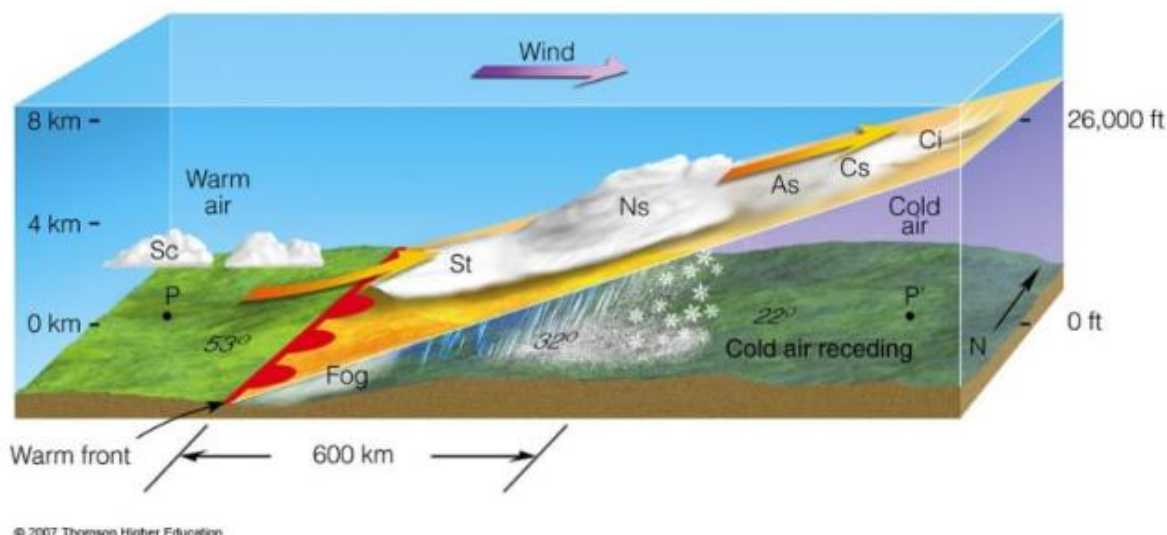
Σχήμα 1.13 Οι κύριοι μηχανισμοί σχηματισμού νεφών: (α) επιφανειακή θέρμανση και κατακόρυφη μεταφορά· (β) εξαναγκασμένη ανύψωση λόγω τοπογραφικών εμποδίων· (γ) σύγκλιση αέριων μαζών κοντά στην επιφάνεια· (δ) εξαναγκασμένη ανύψωση κατά μήκος καιρικών μετώπων (Ahrens, 2009).

1.8 Μέτωπα και Βαρομετρικά Συστήματα

Τα καιρικά μέτωπα αποτελούν ζώνες μετάβασης μεταξύ αερίων μαζών με διαφορετικά χαρακτηριστικά, κυρίως ως προς τη θερμοκρασία και την υγρασία. Τα μέτωπα αποτελούν βασικό στοιχείο της συνοπτικής μετεωρολογίας και συνδέονται άμεσα με την εμφάνιση οργανωμένων καιρικών συστημάτων στα μέσα γεωγραφικά πλάτη. Ανάλογα με τη σχετική κίνηση και τα χαρακτηριστικά των αερίων μαζών, διακρίνονται τέσσερις βασικοί τύποι καιρικών μετώπων: το θερμό, το ψυχρό, το στάσιμο και το συνεσφικμένο μέτωπο.

Θερμό Μέτωπο

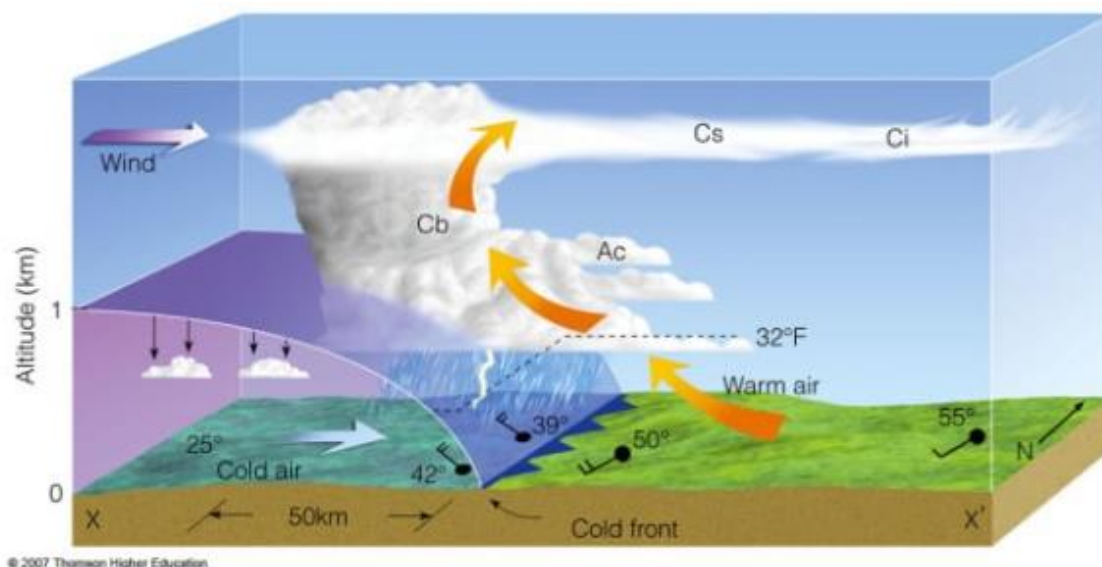
Το θερμό μέτωπο σχηματίζεται όταν μια θερμή αέρια μάζα κινείται προς περιοχή που καταλαμβάνεται από ψυχρότερη αέρια μάζα και αναρριχάται σταδιακά πάνω από αυτήν. Η ανύψωση είναι βαθμιαία και εκτείνεται σε μεγάλη οριζόντια απόσταση, οδηγώντας συνήθως στη δημιουργία στρωματόμορφων νεφών με παρατεταμένο ασθενούς έως μέτριας έντασης υετού. Ο υετός που συνδέεται με θερμά μέτωπα καλύπτει συχνά εκτεταμένες περιοχές και έχει σχετικά ομοιόμορφη χωρική κατανομή.



Σχήμα 1.14 Κατακόρυφη δομή θερμού μετώπου (www.stratusdeck.co.uk).

Ψυχρό Μέτωπο

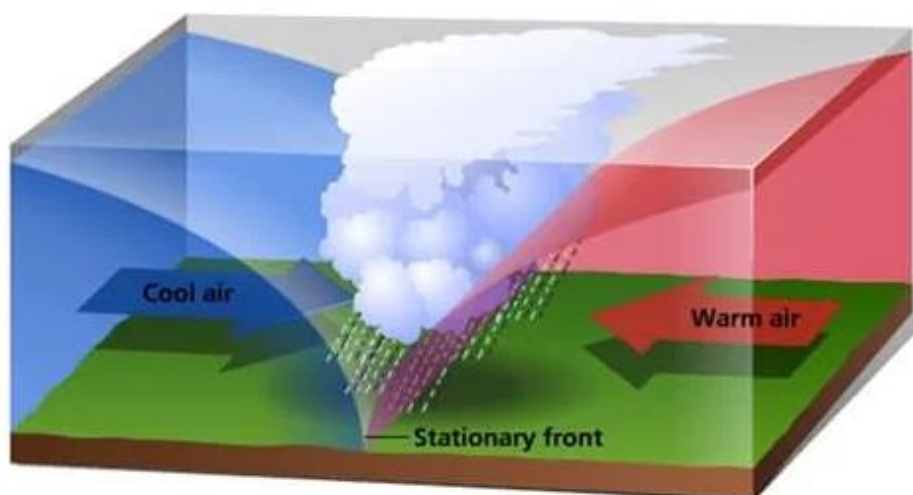
Το ψυχρό μέτωπο σχηματίζεται όταν μια ψυχρή και ξηρή ευσταθής αέρια μάζα, εισερχόμενη σε σφήνα σε μια περιοχή, εκτοπίζει τον θερμό, υγρό και ασταθή αέρα που βρίσκεται μπροστά της, προκαλώντας την απότομη ανύψωσή της. Η ανύψωση αυτή είναι εντονότερη σε σύγκριση με το θερμό μέτωπο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης και την εκδήλωση υετού υψηλής έντασης, συχνά μικρής διάρκειας. Τα ψυχρά μέτωπα συνδέονται συχνά με καταιγίδες, ριπές ανέμου και έντονα επεισόδια υετού.



Σχήμα 1.15 Κατακόρυφη δομή ψυχρού μετώπου (www.stratusdeck.co.uk).

Στάσιμο Μέτωπο

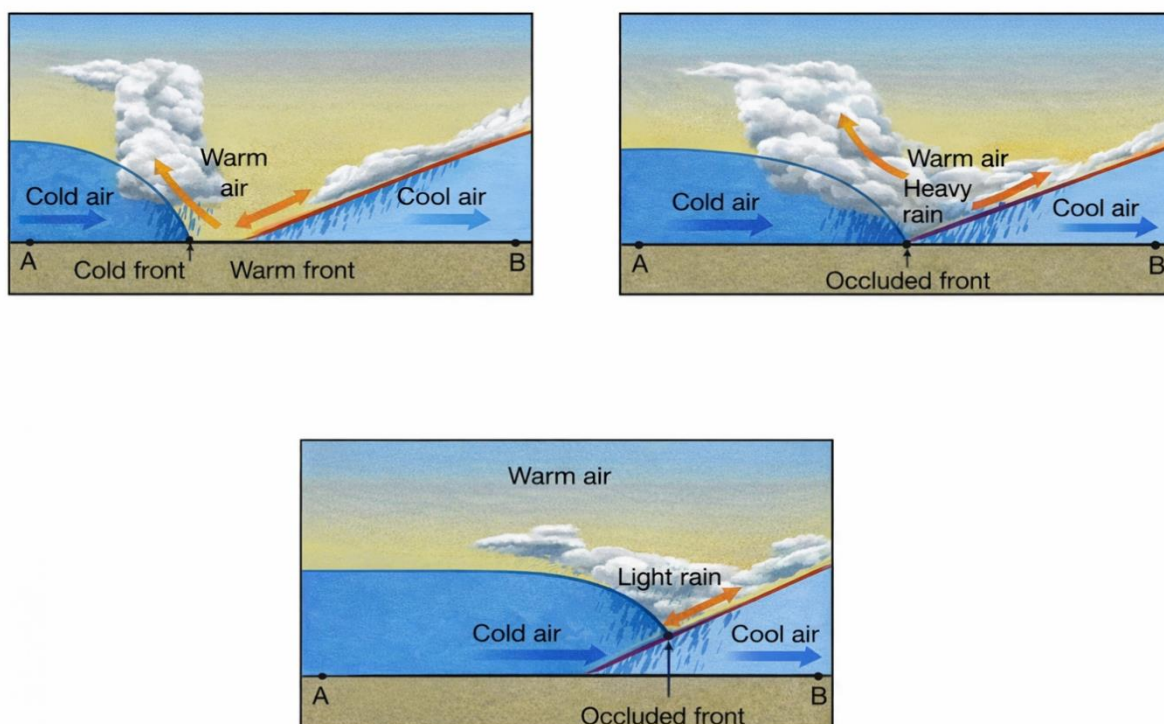
Το στάσιμο μέτωπο παρατηρείται όταν καμία από τις δύο αέριες μάζες δεν υπερισχύει δυναμικά, με αποτέλεσμα το μέτωπο να παραμένει σχεδόν ακίνητο για συνεχόμενο χρονικό διάστημα. Στις περιπτώσεις αυτές, μπορεί να εκδηλωθούν παρατεταμένα φαινόμενα νεφοκάλυψης με ασθενούς έως και μέτριας έντασης νετό.



Σχήμα 1.16 Στάσιμο μέτωπο (www.pmfias.com).

Συνεσφιγμένο Μέτωπο

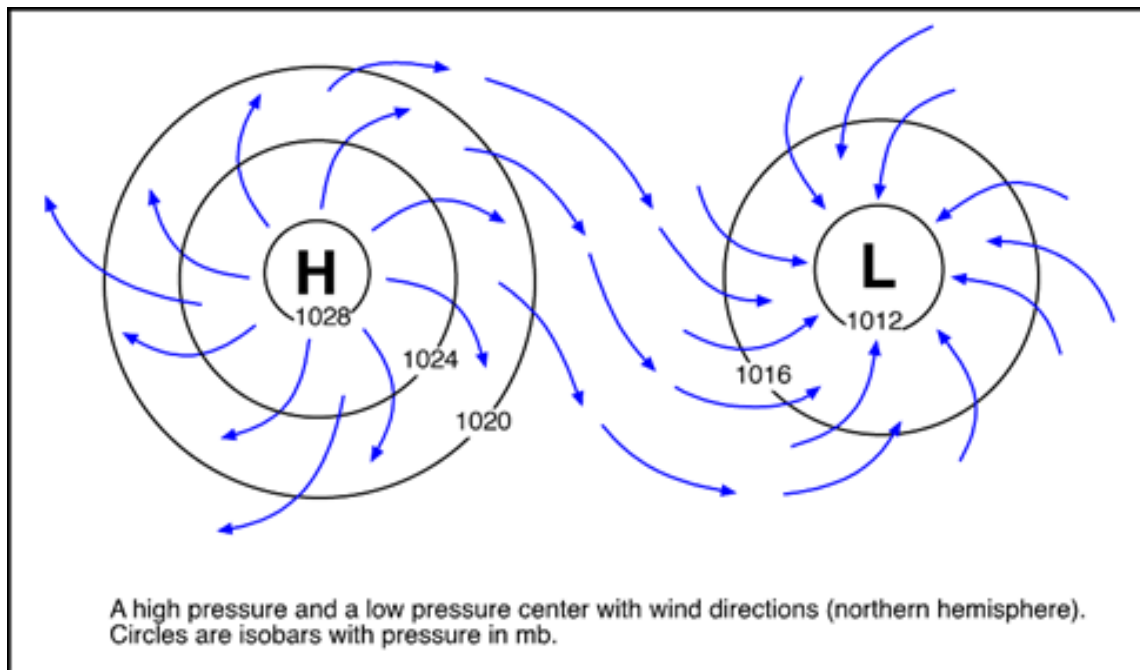
Το συνεσφιγμένο μέτωπο σχηματίζεται όταν ένα ψυχρό μέτωπο κινούμενο ταχύτερα, προσεγγίζει και τελικά «συνεσφίγγει» ένα θερμό μέτωπο, ανυψώνοντας πλήρως τη θερμή αέρια μάζα από την επιφάνεια. Το συνεσφιγμένο μέτωπο συνδέεται με βαρομετρικά συστήματα και χαρακτηρίζεται από εκδήλωση νετού, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει ήπια αλλά και εντονότερα φαινόμενα, ανάλογα με το αν θα είναι ένα συνεσφιγμένο μέτωπο θερμού ή ψυχρού τύπου.



Σχήμα 1.17 Συνεσφιγμένο μέτωπο (www.meteo.gr).

Συνολικά, τα καιρικά μέτωπα αποτελούν έναν από τους βασικότερους μηχανισμούς εκδήλωσης νετού στα μέσα γεωγραφικά πλάτη. Η κατανόηση των χαρακτηριστικών τους και της δυναμικής τους συμπεριφοράς είναι απαραίτητη για την ερμηνεία της χωρικής και χρονικής κατανομής του νετού, ιδιαίτερα σε περιοχές όπως η Ευρώπη και ειδικότερα η Μεσόγειος, όπου τα μετωπικά συστήματα έχουν καθοριστικό ρόλο κατά τη χειμερινή περίοδο.

Τα βαρομετρικά συστήματα αποτελούν θεμελιώδη στοιχεία της συνοπτικής ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας και διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των καιρικών συνθηκών και της κατανομής του νετού στα μέσα γεωγραφικά πλάτη. Ανάλογα με τη διάταξη και την ένταση των ισοβαρών καμπυλών, διακρίνονται κυρίως σε βαρομετρικά χαμηλά (πεδίο χαμηλών πιέσεων) και βαρομετρικά υψηλά (πεδίο υψηλών πιέσεων), τα οποία συνδέονται με διαφορετικού τύπου οριζόντιες και κατακόρυφες κινήσεις και θερμοδυναμικές συνθήκες.

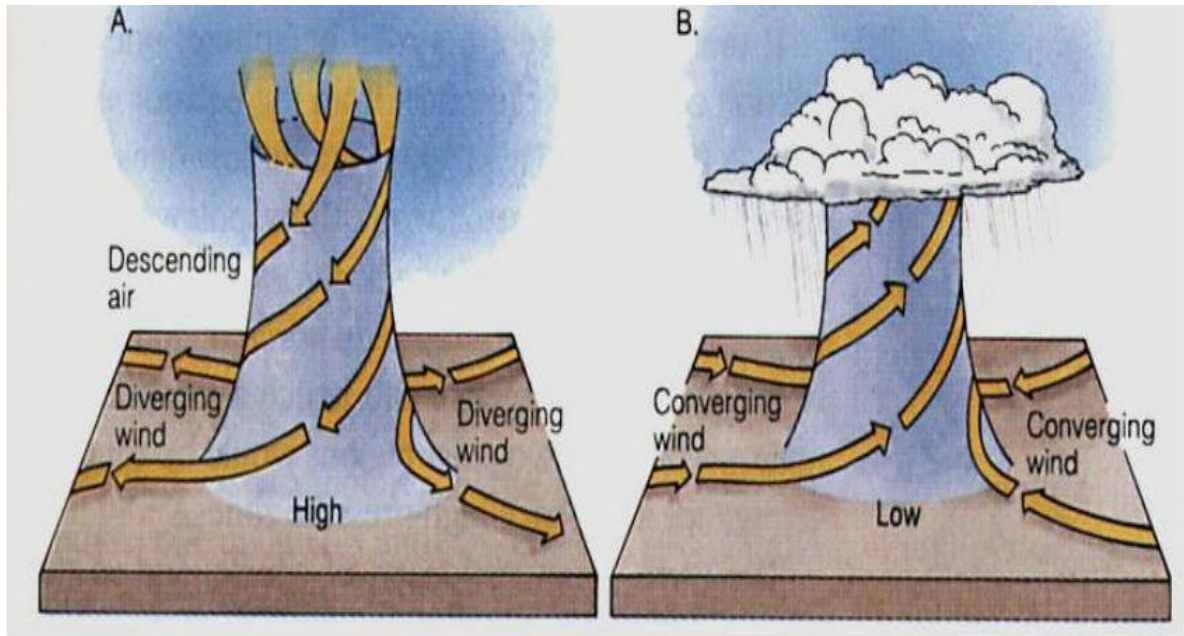


Σχήμα 1.18 Υψηλό (H) και χαμηλό (L) βαρομετρικό σύστημα (www.stogieraweather.weebly.com).

Τα βαρομετρικά χαμηλά (υφέσεις) είναι ένα εκτεταμένο πεδίο χαμηλών πιέσεων και χαρακτηρίζονται από κυκλωνική κυκλοφορία, σύγκλιση του αέρα κοντά στην επιφάνεια και ανοδικές κινήσεις. Η ανύψωση του αέρα οδηγεί σε αδιαβατική ψύξη, νεφογένεση και συχνά στην εκδήλωση φαινομένων νετού. Στα μέσα γεωγραφικά πλάτη, τα βαρομετρικά χαμηλά αποτελούν τον κύριο μηχανισμό αναδιανομής-μεταφοράς της ενέργειας και συνδέονται συχνά με οργανωμένα μετωπικά συστήματα, τα οποία καθορίζουν τον τύπο, την ένταση και τη χρονική διάρκεια του νετού. Ο νετός που σχετίζεται με τις υφέσεις μπορεί να είναι από ήπιας έως μεγάλης έντασης και από μικρής έως μεγάλης διάρκειας, αναλόγως με τη δυναμική του συστήματος. Στον χώρο της Μεσογείου τα βαρομετρικά χαμηλά αποτελούν τον κύριο μηχανισμό εκδήλωσης νετού κατά τη χειμερινή περίοδο.

Αντίθετα, τα βαρομετρικά υψηλά (αντικυκλώνες) χαρακτηρίζονται από αντικυκλωνική κυκλοφορία, απόκλιση του αέρα στην επιφάνεια και καθοδικές κινήσεις στην τροπόσφαιρα (Subsidence). Οι καθοδικές αυτές κινήσεις οδηγούν σε αδιαβατική θέρμανση και επικράτηση συνθηκών ατμοσφαιρικής ευστάθειας, αποτρέποντας έτσι τη νεφογένεση και περιορίζοντας την πιθανότητα εκδήλωσης νετού. Η επικράτηση αντικυκλωνικών συνθηκών συνδέεται συχνά

με αίθριο καιρό, ιδίως όταν τα βαρομετρικά υψηλά παραμένουν σχεδόν στάσιμα για μεγάλο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 1.19 Κατακόρυφη δομή υψηλού (High) και χαμηλού βαρομετρικού συστήματος (Low) (www.slideserve.com).

1.9 Υετός

Ως υετός ορίζεται το σύνολο των κατακρημνισμάτων, σε στερεή ή υγρή φάση, που προέρχονται από τα νέφη και φτάνουν στην επιφάνεια του εδάφους. Συγκεκριμένα, μορφές υετού είναι: η βροχή, το χιόνι, το χαλάζι, οι χιονόκοκκοι (πολύ μικροί κόκκοι πάγου λευκοί και αδιαφανείς με διάμετρο γενικά μικρότερη του ενός χιλιοστού), τα χιονοσφαιρίδια (κόκκοι πάγου λευκοί και αδιαφανείς με διάμετρο από 2 έως 5 χιλιοστά) και τα παγοσφαιρίδια (κόκκοι πάγου διαφανείς με διάμετρο έως 5 χιλιοστά) (Ζιακόπουλος, 2008). Η κατανομή και η ένταση του υετού επηρεάζουν άμεσα το κλίμα, τα υδρολογικά συστήματα, τα οικοσυστήματα και τις ανθρώπινες δραστηριότητες, καθιστώντας τη μελέτη του καίριας σημασίας.

Ο σχηματισμός του υετού συνδέεται άμεσα με τις διεργασίες δημιουργίας νεφών και τη μικροφυσική τους. Καθώς υγρές αέριες μάζες ανυψώνονται στην τροπόσφαιρα, υφίστανται αδιαβατική ψύξη, με αποτέλεσμα τη μείωση της ικανότητάς τους να συγκρατούν υδρατμούς. Όταν επιτευχθεί κορεσμός, οι υδρατμοί συμπυκνώνονται ή αποτίθενται σε πυρήνες συμπίκνωσης, σχηματίζοντας υδροσταγονίδια ή παγοκρυστάλλους. Στα νέφη που η θερμοκρασία είναι θετική, οι υδροσταγόνες σχηματίζονται με διαδικασίες σύγκρουσης και συνένωσης (Collision and Coalescence) των υδροσταγονιδίων, δηλαδή των συμπυκνωμένων υδρατμών από τους οποίους αποτελείται το νέφος. Απαραίτητη προϋπόθεση για την

δημιουργία υδροσταγόνων με τις παραπάνω διαδικασίες είναι η επάρκεια των υδροσταγονιδίων. Επιπλέον, στη δημιουργία του υετού σημαντικό ρόλο παίζουν μια σειρά παραμέτρων όπως: το μέγεθος των υδροσταγονιδίων, το πάχος του νέφους, τα ανοδικά ρεύματα του νέφους, το ηλεκτρικό φορτίο των υδροσταγονιδίων και το ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του νέφους. Στα μέσα γεωγραφικά πλάτη, σημαντικό μέρος του υετού σχηματίζεται μέσω του μηχανισμού Bergeron–Findeisen. Η θεωρία των Bergeron–Findeisen εξηγεί τη δημιουργία υετού από τα νέφη που αποτελούνται από παγοκρυστάλλους, υδροσταγονίδια και υδροσταγονίδια σε υπέρτηξη, δηλαδή υδροσταγονίδια που παραμένουν σε υγρή μορφή, ακόμα και αν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι αρνητική. Σε αυτά τα νέφη, οι παγοκρύσταλλοι κερδίζουν μάζα σε βάρος των υδροσταγονιδίων και διογκούμενοι μετατρέπονται σε κρυστάλλους χιονιού. Ευνοϊκές συνθήκες για περαιτέρω συνένωση των κρυστάλλων χιονιού μέσα στο νέφος δημιουργούνται όταν οι θερμοκρασίες δεν είναι πολύ χαμηλές. Με τις συνενώσεις των κρυστάλλων χιονιού, σχηματίζονται οι χιονονιφάδες οι οποίες χαρακτηρίζονται από ακανόνιστο σχήμα. Κατά την πτώση των χιονονιφάδων από τα νέφη και ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες, λαμβάνουν χώρα οι διαδικασίες της εξάχνωσης, η απευθείας δηλαδή μετατροπή του χιονιού σε υδρατμούς, της τήξης (μετατροπή του χιονιού σε βροχή) ή της εξάτμισης (η μετατροπή του νερού που προέρχεται από την τήξη σε υδρατμούς). Εξάχνωση ή εξάτμιση παρατηρείται όταν η υγρασία του αέρα κάτω από το νέφος είναι χαμηλή. Στις περιπτώσεις αυτές παρατηρούνται συχνά γραμμές ή ραβδώσεις βροχής (virga), να κρέμονται από το νέφος χωρίς να φτάνουν στο έδαφος. (Ζιακόπουλος, 2008)

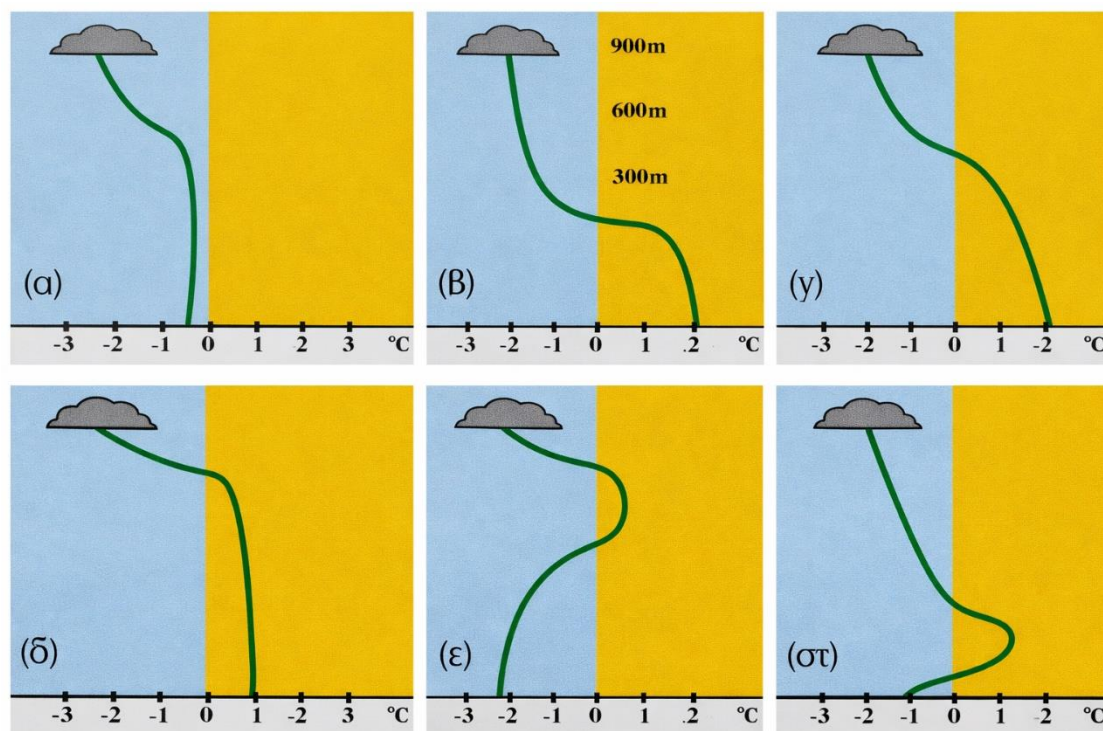
Ο υετός παρουσιάζει έντονη μεταβλητότητα τόσο σε χωρική όσο και σε χρονική κλίμακα. Ακόμη και σε μικρές αποστάσεις, η ποσότητα και η μορφή του υετού μπορούν να διαφοροποιούνται σημαντικά, ιδιαίτερα σε περιοχές με πολύπλοκη τοπογραφία ή έντονη αλληλεπίδραση ξηράς–θάλασσας. Αντίστοιχα, σε χρονική κλίμακα, ο υετός χαρακτηρίζεται από έντονη εποχικότητα, αλλά και από σημαντικές διακυμάνσεις σε ημερήσια, ετήσια και διαχρονική βάση. Λόγω αυτής της μεταβλητότητας, ο υετός συνιστά επιστημονική πρόκληση ως προς την παρατήρηση, την προσομοίωση και την κλιματολογική ανάλυση.

1.9.1 Χιόνι

Το χιόνι έχει ιδιαίτερη σημασία σε ορεινές και ημιορεινές περιοχές αλλά και γενικότερα, καθώς η χιονοκάλυψη επηρεάζει τα αποθέματα υδάτων και την απορροή. Ταυτόχρονα, αποτελεί μία μορφή υετού με έντονη εξάρτηση από το υψόμετρο και την εποχικότητα, γεγονός που το καθιστά ιδιαίτερα ευαίσθητο σε μεταβολές της θερμοκρασίας.

Στις περισσότερες περιπτώσεις ο υετός ξεκινά από τα νέφη με τη μορφή χιονιού. Το καλοκαίρι που το επίπεδο πήξης (επίπεδο στο οποίο η θερμοκρασία του αέρα είναι μηδέν βαθμοί Κελσίου) είναι υψηλό, οι χιονονιφάδες λιώνουν πολύ πριν φτάσουν στο έδαφος, αλλά το χειμώνα, που το επίπεδο πήξης είναι χαμηλό, έχουν περισσότερες πιθανότητες να επιζήσουν και να φτάσουν στο έδαφος. Γενικά, οι χιονονιφάδες μπορεί να διανύσουν αποστάσεις 250 έως 300 m κάτω από το επίπεδο πήξης χωρίς να λιώσουν, τουλάχιστον στο μεγαλύτερο μέρος τους.

Όταν οι θερμοκρασίες κάτω από το νέφος είναι μεγαλύτερες από τους 0°C , αλλά ο αέρας είναι σχετικά ξηρός, το νερό που προέρχεται από το λιώσιμο αριθμού χιονονιφάδων εξατμίζεται ψύχοντας το περιβάλλον. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση του ρυθμού λιώσιματος των υπόλοιπων χιονονιφάδων. Σε αυτήν την περίπτωση, χιονονιφάδες μπορεί να φτάσουν στο έδαφος ακόμα και αν η θερμοκρασία είναι 3°C ή 4°C πάνω από το μηδέν. Είναι χαρακτηριστικό πως όταν η θερμοκρασία είναι λίγο πάνω από 0°C , πολλές φορές σχηματίζονται μεγάλες χιονονιφάδες, ενώ όταν η θερμοκρασία είναι πολύ χαμηλή, το μέγεθος των χιονονιφάδων είναι μικρό. Αυτό συμβαίνει διότι στη πρώτη περίπτωση, οι άκρες των χιονονιφάδων καθώς πέφτουν αρχίζουν να λιώνουν, σχηματίζονται μεμβράνες νερού που δρουν ως κόλα για άλλες χιονονιφάδες που έρχονται σε επαφή με αυτές, με αποτέλεσμα το σχηματισμό τεράστιων χιονονιφάδων. Στη δεύτερη περίπτωση όπου οι χιονονιφάδες πέφτουν μέσα από πολύ ψυχρό αέρα με χαμηλό ποσοστό υγρασίας, δεν μπορούν να κολλήσουν μεταξύ τους και φτάνουν στο έδαφος με τη μορφή πούδρας. Η θερμοκρασία που επικρατεί κοντά στο έδαφος δεν αποτελεί ασφαλή ένδειξη για το αν ο υετός θα φτάσει στη γη υπό μορφή χιονιού ή βροχής. Πρέπει να εξετάζεται πάντα η κατακόρυφη μεταβολή της θερμοκρασίας, κυρίως στα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας. Στο Σχήμα 1.19 αναφέρονται μερικές τυπικές καθ ύψος μεταβολές της θερμοκρασίας που συνδέονται με τους διάφορους τύπους υετού που φθάνει στο έδαφος.



Σχήμα 1.20 Κατακόρυφες τυπικές κατανομές της θερμοκρασίας και οι αντίστοιχες μορφές υετού: (α) και (β) χιόνι, (γ) χιονόνερο, (δ) βροχή, (ε) χιονοσφαιρίδια, (στ) πηγνυμένη βροχή (Ζιακόπουλος, 2008) .

Για να φθάσει το χιόνι στο έδαφος, δεν απαιτείται η θερμοκρασία να είναι αρνητική σε όλη τη διαδρομή από τη βάση του νέφους μέχρι την επιφάνεια του εδάφους (περίπτωση α), αλλά μπορεί να συμβεί ακόμη και με θετικές επιφανειακές θερμοκρασίες, αρκεί το σημείο πήξης να βρίσκεται σε χαμηλό ύψος (περίπτωση β). Αν το σημείο πήξης βρίσκεται σε ύψος

μεγαλύτερο των τριακοσίων μέτρων, παρατηρείται χιονόνερο (περίπτωση γ) ή βροχή (περίπτωση δ). Χιονοσφαιρίδια παρατηρούνται στην περίπτωση (ε) με την εξής διαδικασία: οι χιονονιφάδες καθώς εισέρχονται κατά την πτώση τους σε στρώμα με θετικές θερμοκρασίες, λιώνουν. Αν το τελευταίο στρώμα πριν από το έδαφος έχει αρνητική θερμοκρασία, οι λιωμένες χιονονιφάδες πήζουν και πέφτουν ως χιονοσφαιρίδια. Για να προλάβουν να πήζουν οι χιονονιφάδες, το στρώμα των αρνητικών θερμοκρασιών θα πρέπει να είναι αρκετά παχύ. Αν το στρώμα αυτό είναι λεπτό, οι σταγόνες παραμένουν σε υπέρτηξη έως την πρόσκρουσή τους στο έδαφος, με συνέπεια να παγώνουν ακαριαία σχηματίζοντας διαφανή πάγο (περίπτωση στ). Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται πηγνυμένη βροχή, ένα φαινόμενο ιδιαίτερα επικίνδυνο διότι ο διαφανής πάγος είναι συμπαγής, δεν θρυμματίζεται εύκολα και είναι δυσδιάκριτος. (Ζιακόπουλος, 2008).

1.9.2 Βροχή

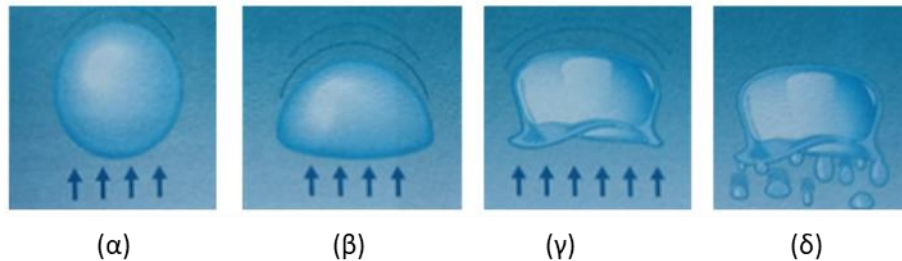
Η βροχή αποτελεί τη συχνότερη μορφή υετού. Ο σχηματισμός της βροχής ξεκινά με τη μεγέθυνση των σταγονιδίων εντός των νεφών, μέσω διεργασιών σύγκρουσης και συνένωσης (Collision and Coalescence) ή μέσω μικροφυσικών διεργασιών που περιλαμβάνουν τη συνύπαρξη υγρής και στερεής φάσης. Η βροχή μπορεί να προέρχεται τόσο από στρωματόμορφα νέφη, όσο και από νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης. Στην πρώτη περίπτωση, ο υετός είναι συνήθως εκτεταμένος και παρατεταμένος, με σχετικά χαμηλή έως και μέτρια ένταση και συνδέεται με μεγάλης κλίμακας ανύψωση του αέρα, όπως αυτή που παρατηρείται σε θερμά μέτωπα ή σε εκτεταμένα βαρομετρικά χαμηλά. Αντίθετα, η βροχή που προέρχεται από νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης χαρακτηρίζεται από υψηλή ένταση και μικρή χρονική διάρκεια, εμφανίζοντας συχνά έντονη χωρική ανομοιογένεια (Ahrens, 2009).

Η ένταση και η διάρκεια της βροχόπτωσης εξαρτώνται από τη διαθεσιμότητα υγρασίας, την κατακόρυφη ταχύτητα των ανοδικών ρευμάτων και τη δυναμική του νεφικού συστήματος. Συνεπώς, η βροχή αποτελεί μια μορφή υετού με έντονη μεταβλητότητα, τόσο σε τοπική όσο και σε ευρύτερη κλίμακα.

Το σχήμα της σταγόνας της βροχής

Ένας μύθος που είχε επικρατήσει είναι ότι οι σταγόνες της βροχής έχουν σχήμα σαν το δάκρυ. Στην πραγματικότητα, οι σταγόνες της βροχής αρχικά είναι σφαιρικές. Καθώς διογκώνονται μέσω των διαδικασιών της σύγκρουσης και της συνένωσης, οι ταχύτητές τους αυξάνονται και δέχονται μεγαλύτερη αντίσταση από τον αέρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να γίνονται πιο πεπλατυσμένες στη βάση τους. Καθώς η βάση τους έχει μεγαλύτερη διάσταση, η αντίσταση του αέρα αυξάνεται με αποτέλεσμα η σταγόνα να αρχίζει να παραμορφώνεται. Η επίπεδη βάση της αποκτά ένα κοίλο σχήμα, αποτελούμενη από ένα σχετικά παχύ χείλος. Τελικά, η αντίσταση του αέρα επικρατεί της επιφανειακής τάσης, η οποία είναι υπεύθυνη για τη συνοχή των σταγόνων, έχοντας ως αποτέλεσμα τόσο το δακτυλιοειδές χείλος της όσο και η σαν φυσαλίδα κορυφή της να διασπώνται σε μικρότερες πολυπληθείς σταγόνες. Στη συνέχεια, οι μικρού μεγέθους σταγόνες που προκύπτουν διογκώνονται ξανά με σύγκρουση και

συνένωση. Το γεγονός της διάσπασης των σταγόνων καθώς πέφτουν, εξηγεί το λόγο για τον οποίο οι σταγόνες δεν μπορούν να αποκτήσουν τεράστιο μέγεθος μέσω της σύγκρουσης και της συνένωσης. Αν οι σταγόνες μεγεθύνονταν συνεχώς κατά την πορεία τους προς το έδαφος, τότε θεωρητικά θα μπορούσαν να αποκτήσουν μέγεθος ίσο με αυτό μιας μπάλας του μπάσκετ (Aguado and Burt, 2013).



Σχήμα 1.21 Πορεία σταγόνων βροχής καθώς πέφτουν: αρχικά είναι σφαιρικής μορφής (α), η βάση τους πλαταίνει καθώς πέφτουν (β), η αντίσταση του αέρα παραμορφώνει τη βάση της σταγόνας (γ), τελικά η σταγόνα διασπάται (δ) (Aguado and Burt, 2013).

1.9.3 Χαλάζι

Το χαλάζι αποτελείται από πολλαπλά στρώματα πάγου τα οποία έχουν πάχος μερικών χιλιοστών, αλλά υπό ακραίες συνθήκες το μέγεθός του μπορεί να είναι συγκριτικά αρκετά μεγαλύτερο. Οι χαλαζόκοκκοι αποτελούνται συνήθως από ομόκεντρες σφαίρες πάγου, όμως σε κάποιες περιπτώσεις το σχήμα τους μπορεί να είναι ακανόνιστο. Κανένα άλλο είδος νετού δεν είναι ικανό να δημιουργήσει σταγόνες ή σωματίδια τόσο μεγάλου μεγέθους όπως είναι το χαλάζι. Στα νέφη που σχηματίζονται οι χαλαζόκοκκοι εμπεριέχονται μεγάλες ποσότητες νερού και χαρακτηρίζονται από πολύ ισχυρά ανοδικά ρεύματα αέρα ώστε να μπορεί να αιωρείται αυτό το είδος νετού. Επομένως, το χαλάζι προκύπτει από τους σωρειτομελανίες. Η ανάπτυξη του χαλαζόκοκκου ξεκινά με το σχηματισμό ενός μικρού σωματιδίου, γνωστό ως έμβρυο, που συνήθως αποτελείται από πορώδεις παγοκρυστάλλους, μέσα σε μια περιοχή του νέφους όπου συνυπάρχουν σταγόνες σε υπέρτηξη και παγοκρύσταλλοι. Τα ισχυρά ανοδικά ρεύματα αέρα δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένα εντός του σωρειτομελανιών από τους οποίους προέρχεται το χαλάζι. Υπάρχουν περιοχές όπου είναι εξαιρετικά ισχυρά και παρακείμενες περιοχές που είναι πιο ασθενή. Μέσα στις τελευταίες ξεκινά συνήθως ο σχηματισμός του χαλαζιού. Κάποιοι από τους αναπτυσσόμενους χαλαζόκοκκους παρασύρονται από τον αέρα από τα άκρα προς τον πυρήνα της περιοχής των ισχυρών ανοδικών ρευμάτων, με αποτέλεσμα να μεταφέρονται στα ανώτερα άκρα του νέφους και να εκτινάσσονται. Όταν συμβαίνει αυτό, οι χαλαζόκοκκοι δεν διαθέτουν αρκετό χρόνο έτσι ώστε να συσσωρεύσουν μεγάλες ποσότητες πάγου και να διογκωθούν και πέφτουν από το νέφος έχοντας σχετικά μικρό μέγεθος. Οι χαλαζόκοκκοι μεγάλων διαστάσεων μπορούν να δημιουργηθούν όταν τα αναπτυσσόμενα σωματίδια ανέρχονται με μικρή ταχύτητα περιμετρικά της περιοχής των έντονων ανοδικών ρευμάτων αέρα. Αυτό τους δίνει τη χρονική δυνατότητα να έρθουν σε επαφή με τις υδροσταγόνες σε υπέρτηξη οι οποίες παγώνουν πάνω στον υπάρχοντα πάγο. Οι χαλαζόκοκκοι πέφτουν όταν

αποκτήσουν τέτοιο βάρος έτσι ώστε να μην μπορούν να διατηρηθούν στην ατμόσφαιρα από τα ανοδικά ρεύματα. Πέφτουν σε μια περιοχή εξωτερικά της ζώνης των ισχυρών ανοδικών κινήσεων της αέριας μάζας η οποία ονομάζεται καταιγισμός χαλαζιού (Aguado and Burt, 2013).



Σχήμα 1.22 Σχηματισμός χαλαζιού μέσα σε ένα καταιγιδοφόρο νέφος (www.meteo.gr).

1.10 Σκοπός της εργασίας

Ο υετός αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους κλιματικούς παράγοντες, με άμεσες επιπτώσεις στη διαθεσιμότητα υδατικών πόρων, τα φυσικά οικοσυστήματα και τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Στην περιοχή της Ελλάδας, η χωρική και χρονική κατανομή του υετού χαρακτηρίζεται από έντονη μεταβλητότητα, η οποία οφείλεται τόσο στη σύνθετη τοπογραφία και τη γεωγραφική θέση της χώρας, όσο και στην επίδραση μεγάλης κλίμακας ατμοσφαιρικών διεργασιών. Η διερεύνηση της μακροχρόνιας συμπεριφοράς του υετού είναι μείζονος σημασίας στη κλιματολογική έρευνα.

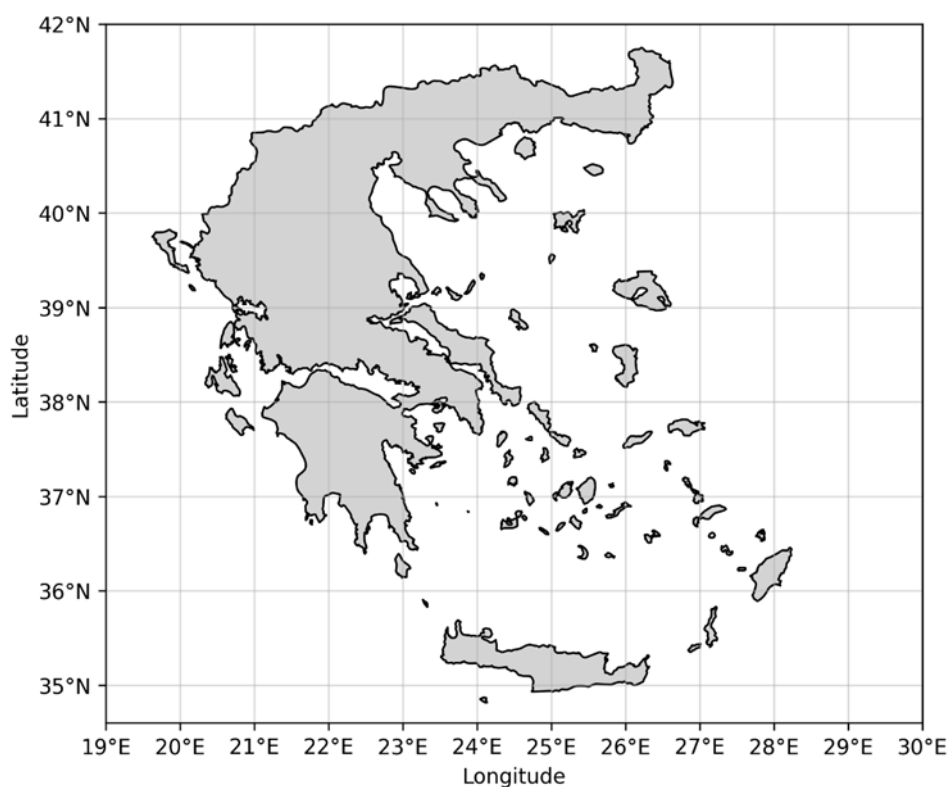
Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η διερεύνηση της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας του υετού στην Ελλάδα κατά τη χρονική περίοδο 1950–2024, με τη χρήση δεδομένων επανανάλυσης ERA5-Land. Η ανάλυση επικεντρώνεται αποκλειστικά στη χερσαία περιοχή της χώρας. Ειδικότερα, η μελέτη αποσκοπεί στον υπολογισμό και τη χαρτογράφηση των κλιματικών μέσων τιμών του υετού. Κυρίως όμως, εξετάζονται οι χρονικές τάσεις του υετού σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες, με στόχο την ανίχνευση πιθανών μακροχρόνιων μεταβολών στο καθεστώς υετού της χώρας. Πέραν της ετήσιας βάσης, πραγματοποιείται ανάλυση και σε πιο συγκεκριμένες χρονικές κλίμακες, όπως εποχική και μηνιαία, ώστε να αναδύονται μεταβολές που δεν θα γινόταν αντιληπτές σε ετήσια βάση αναλύσεων. Επιπλέον, πραγματοποιείται προσδιορισμός και ανάλυση των ακραίων τιμών υετού για τον εντοπισμό και τη διερεύνηση της πορείας των ακραίων επεισοδίων υετού, μέσω της ανάλυσης κατάλληλων δεικτών. Η ανάλυση πραγματοποιείται στη βάση υδρολογικού έτους, το οποίο ορίζεται από τον Σεπτέμβριο έως τον Αύγουστο του επόμενου έτους.

Κεφάλαιο 2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται η περιοχή μελέτης, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εργασία αυτή και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την ανάλυση των δεδομένων της εξεταζόμενης περιοχής. Αρχικά, περιγράφεται η γεωγραφική έκταση της περιοχής προς ανάλυση, καθώς και τα δεδομένα επανανάλυσης που αξιοποιήθηκαν για την εργασία. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται σύγκριση των δεδομένων επανανάλυσης με μετρήσεις μετεωρολογικών σταθμών με στόχο την αξιολόγηση της αξιοπιστίας και της καταλληλότητας των δεδομένων επανανάλυσης για την περαιτέρω ανάλυση. Τέλος, παρουσιάζονται οι στατιστικές και υπολογιστικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν, οι οποίες περιλαμβάνουν την παραγοντική ανάλυση, την τμηματική παλινδρόμηση, τον έλεγχο Mann–Kendall, τον εκτιμητή Theil–Sen και τους δείκτες ανάλυσης ακραίων φαινομένων υετού.

2.1 Περιοχή Μελέτης

Η περιοχή κάλυψης αφορά μόνο στη χερσαία περιοχή (ηπειρωτική χώρα και επιφάνεια ξηράς των νησιών) της Ελλάδας, που περικλείεται μεταξύ των παραλλήλων 34.6°N και 42°N γεωγραφικό πλάτος και από 19°E έως 30°E γεωγραφικό μήκος.



Σχήμα 2.1 Χάρτης της γεωγραφικής περιοχής στην οποία πραγματοποιήθηκε η ανάλυση.

2.2 Δεδομένα

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα επανανάλυσης (reanalysis) ERA5-Land, από τη βάση δεδομένων του Copernicus Climate Data Store, η οποία τέθηκε σε λειτουργία από τον ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Το ERA5-Land είναι ένα σύνολο δεδομένων επανανάλυσης που παρέχει μια συνεχή εικόνα της εξέλιξης των μεταβλητών της χερσαίας επιφάνειας της γης για διάστημα αρκετών δεκαετιών (οκτώ) σε βελτιωμένη ανάλυση σε σύγκριση με το ERA5. Η επανανάλυση, χρησιμοποιώντας τους νόμους της φυσικής και κατάλληλες μαθηματικές μεθόδους (π.χ. τεχνικές data assimilation), συνδυάζει δεδομένα παρατηρήσεων με εκτιμήσεις-υπολογισμούς μετεωρολογικών μοντέλων από όλο τον κόσμο και παρέχει ένα πλήρες και συνεπές σύνολο δεδομένων με πλήρη πλανητική κάλυψη. Η μέθοδος reanalysis παράγει δεδομένα που εκτείνονται σε βάθος αρκετών δεκαετιών πίσω στο χρόνο, παρέχοντας μια ακριβή περιγραφή του κλίματος του παρελθόντος (C3S, 2019).

Πιο συγκεκριμένα, ελήφθησαν ωριαία δεδομένα για τη μετεωρολογική παράμετρο του συνολικού υετού «Total Precipitation» από το πακέτο δεδομένων «ERA5-Land hourly data from 1950 to present», στις 00:00 UTC, όπου είναι καταγεγραμμένη η αθροιστική ημερήσια τιμή υετού αλλά και το ύψος του υετού για κάθε ώρα του 24-ώρου. Οι μονάδες της μεταβλητής λαμβάνονται σε μέτρα (m) από το πακέτο δεδομένων και για τις ανάγκες της εργασίας μετατρέπονται σε χιλιοστά (mm). Τα δεδομένα καλύπτουν τη χρονική περίοδο 1950–2024, με ωριαία χρονική ανάλυση.

Τα δεδομένα του ERA5-Land παρέχονται σε πλεγματικά σημεία με χωρική ανάλυση $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ γεωγραφικό μήκος και γεωγραφικό πλάτος (περίπου 9 km), αποτελώντας υψηλής ανάλυσης (χωρικής και χρονικής) ανάλυσης κλιματικά δεδομένα για την επιφάνεια της ξηράς.

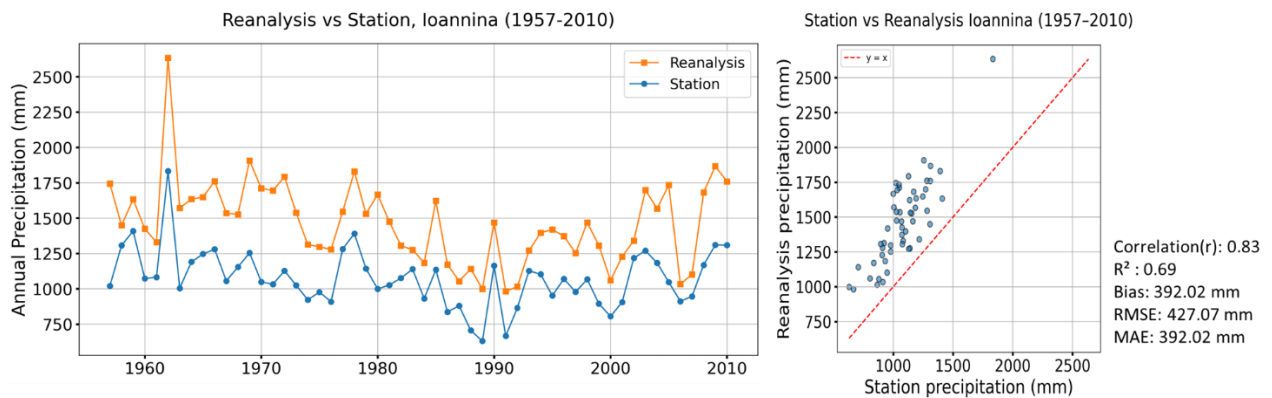
Από την αρχική βάση δεδομένων, δημιουργήθηκαν νέα πακέτα δεδομένων με το αθροιστικό ύψος του υετού, σε μηνιαία, εποχική, χειμερινή-θερινή και ετήσια βάση, μέσω της Python, φιλτράροντας και κρατώντας τα δεδομένα άνω του 1 mm από τα αρχικά ημερήσια δεδομένα. Όλα τα σύνολα δεδομένων με βάση το υδρολογικό έτος ξεκινώντας από το Σεπτέμβριο ενός έτους έως και το μήνα Αύγουστο του επόμενου έτους. Έπειτα, χρησιμοποιήθηκε shapefile αρχείο με τα σύνορα της Ελλάδας, από το «Naturalearthdata», ώστε να χρησιμοποιηθεί ως «μάσκα» στην Python με σκοπό να διατηρηθούν τα δεδομένα μόνο εντός συνόρων της Ελλάδας, επικράτεια για την οποία πραγματοποιείται η μελέτη. Προέκυψαν έτσι 1279 στο σύνολο, έγκυρα πλεγματικά σημεία σε επίπεδο χωρικής κάλυψης, για κάθε σύνολο δεδομένων (dataset).

2.3 Σύγκριση δεδομένων επανανάλυσης με μετρήσεις σταθμών

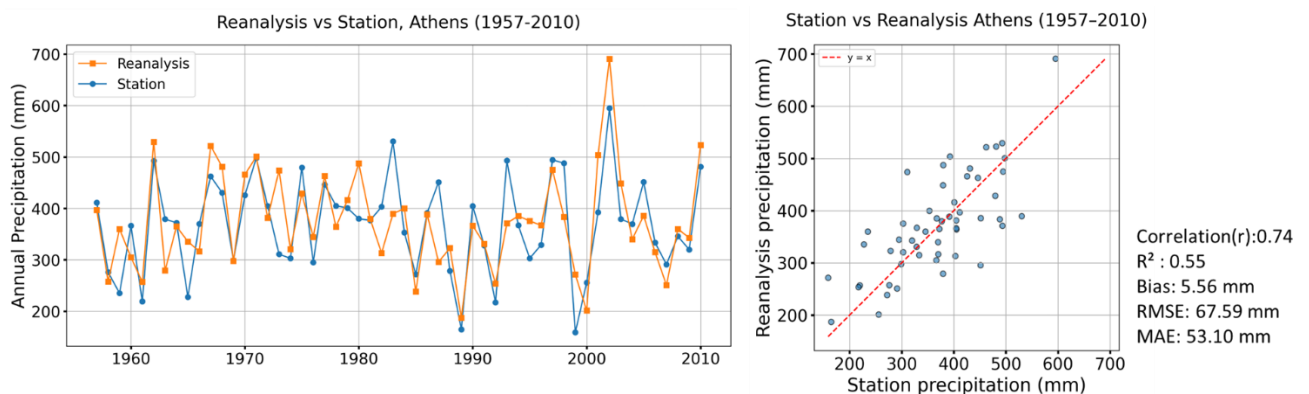
Το σύνολο δεδομένων ERA5-Land, όπως και κάθε άλλη προσομοίωση, παρέχει εκτιμήσεις που έχουν έναν βαθμό αβεβαιότητας. Τα αριθμητικά μοντέλα μπορούν να αποδώσουν με μεγαλύτερη ή μικρότερη ακρίβεια τις φυσικές διεργασίες που επηρεάζουν τη μεταβολή των μετεωρολογικών παραμέτρων. Γενικά, η αβεβαιότητα των εκτιμήσεων του

μοντέλου αυξάνεται σε παλαιότερες χρονικές περιόδους, καθώς μειώνεται ο αριθμός των διαθέσιμων παρατηρήσεων που απαιτούνται για τη δημιουργία αξιόπιστου εξωτερικού αιτίου («atmospheric forcing») (C3S, 2019).

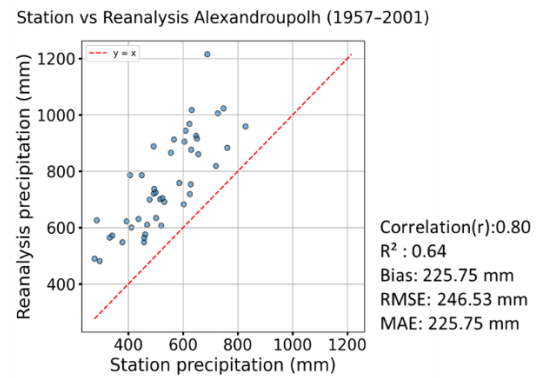
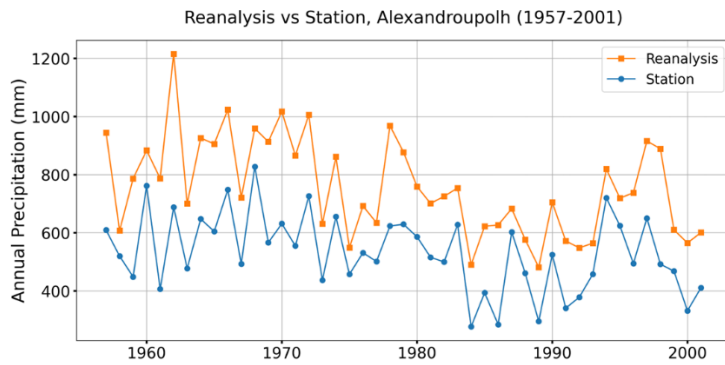
Για αυτό τον λόγο, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των δεδομένων επανανάλυσης που ελήφθησαν από τη βάση ERA5-Land, με μετρήσεις από επιλεγμένους μετεωρολογικούς σταθμούς εδάφους, ώστε να γίνει μια εκτίμηση της ακρίβειας των δεδομένων επανανάλυσης. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για τέσσερις περιοχές, την Αθήνα, την Αλεξανδρούπολη, το Ηράκλειο και τα Ιωάννινα. Τα δεδομένα των επίγειων σταθμών τα οποία χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση-αξιολόγηση των δεδομένων επανανάλυσης, προέρχονται από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY) της Ελλάδος. Η σύγκριση αφορά τη χρονική περίοδο 1957 έως 2010 για τα Ιωάννινα και την Αθήνα και από το 1957 έως το 2001 για την Αλεξανδρούπολη και το Ηράκλειο, στη βάση του υδρολογικού έτους.



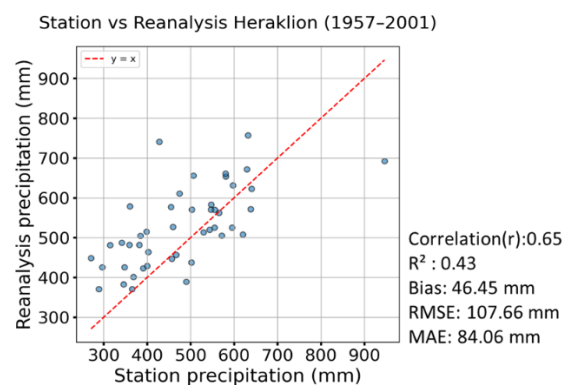
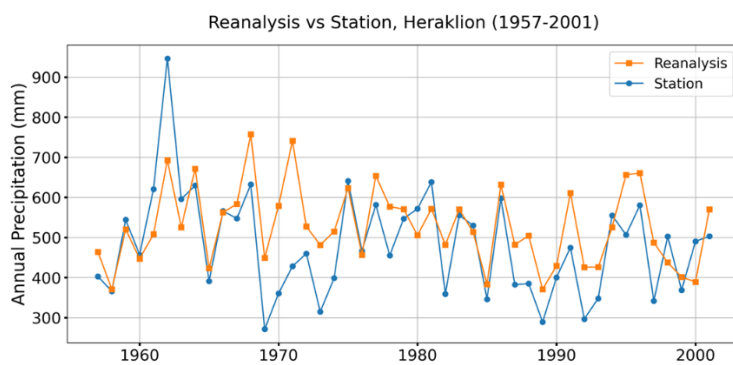
Σχήμα 2.2 Σύγκριση δεδομένων επανανάλυσης ετήσιου ύψους νετού (mm) με μετρήσεις σταθμού για τα Ιωάννινα.



Σχήμα 2.3 Σύγκριση δεδομένων επανανάλυσης ετήσιου ύψους νετού (mm) με μετρήσεις σταθμού για την Αθήνα.



Σχήμα 2.4 Σύγκριση δεδομένων επανάλυσης ετήσιου ύψους νετού (mm) με μετρήσεις σταθμού για την Αλεξανδρούπολη.



Σχήμα 2.5 Σύγκριση δεδομένων επανάλυσης ετήσιου ύψους νετού (mm) με μετρήσεις σταθμού για το Ηράκλειο.

Τα στατιστικά μεγέθη Συντελεστής Συσχέτισης (Correlation (r)), Συντελεστής Προσδιορισμού (R^2), Μέσο Σφάλμα (Bias), Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (MAE), Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (RMSE), υπολογίστηκαν σύμφωνα με τους κλασικούς ορισμούς τους και για τον προσδιορισμό τους χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη NumPy της Python. Πιο συγκεκριμένα, οι στατιστικές παράμετροι υπολογίζονται βάσει των παρακάτω σχέσεων:

Συντελεστής Συσχέτισης (Correlation Coefficient) (r):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}} \quad (2.1)$$

όπου:

y_i : τιμή σταθμού

$\hat{y}_i$: τιμή από το μοντέλο reanalysis

$\bar{y}$: μέση τιμή των καταγραφών του σταθμού

$\hat{\bar{y}}$: μέση τιμή των τιμών του μοντέλου

n : πλήθος των δεδομένων

Ο συντελεστής συσχέτισης r εκφράζει τον βαθμό γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των παρατηρούμενων και των υπολογισμένων τιμών. Οι τιμές του κυμαίνονται από:

$r = 1 \rightarrow$ τέλεια θετική συσχέτιση

$r = 0 \rightarrow$ καμία γραμμική συσχέτιση

$r = -1 \rightarrow$ τέλεια αρνητική συσχέτιση

Όσο πιο κοντά βρίσκεται το r στο 1, τόσο καλύτερα το μοντέλο reanalysis αναπαράγει τη μεταβλητότητα των παρατηρήσεων.

Συντελεστής Προσδιορισμού (Coefficient of determination) (R^2):

$$R^2 = r^2 \quad (2.2)$$

όπου:

r : συντελεστής συσχέτισης

Το R^2 εκφράζει το ποσοστό της διακύμανσης των παρατηρήσεων που εξηγείται από το μοντέλο.

Μέσο Σφάλμα (Bias):

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) \quad (2.3)$$

όπου:

y_i : παρατηρούμενη τιμή

$\hat{y}_i$: τιμή μοντέλου

n : πλήθος δεδομένων

Το Bias δείχνει αν το μοντέλο υπερεκτιμά ή υποεκτιμά τις παρατηρήσεις.

Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (Root Mean Square Error) (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (2.4)$$

όπου:

y_i : παρατηρούμενη τιμή

$\hat{y}_i$: τιμή μοντέλου

n : πλήθος δεδομένων

Το RMSE εκφράζει το μέγεθος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ μοντέλου και παρατηρήσεων.

Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (Mean Absolute Error) (MAE):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad (2.5)$$

όπου:

y_i : παρατηρούμενη τιμή

$\hat{y}_i$: τιμή μοντέλου

n : πλήθος δεδομένων

Το MAE εκφράζει τη μέση απόλυτη απόκλιση μεταξύ μοντέλου και παρατηρήσεων.

Αυτό που προκύπτει συμπερασματικά από αυτή τη σύγκριση (Σχήμα 2.2 – 2.5), είναι πως τα δεδομένα Reanalysis αναπαράγουν σε πολύ καλό βαθμό τη διαχρονική από έτος σε έτος μεταβολή του υετού. Επίσης, παρατηρείται μία μάλλον συστηματική υπερεκτίμηση του υετού από τα δεδομένα ERA5-Land. Είναι άλλωστε χαρακτηριστικό πως τα δεδομένα επανάλυσης έχουν την τάση να υπερεκτιμούν τα ποσά υετού, όπως διαφαίνεται στην παρούσα σύγκριση, και διαπιστώθηκε και από άλλες μελέτες. Παράδειγμα, στην εργασία των Alexandridis et al. (2023), με τίτλο «*Evaluation of ERA5 and ERA5-Land Reanalysis Precipitation Data with Rain Gauge Observations in Greece*», αναδεικνύεται πως στις περισσότερες περιπτώσεις, τα reanalysis δεδομένα υπερεκτιμούν τις τιμές του υετού σε σχέση με αυτές των σταθμών. Σύμφωνα με το τεχνικό εγχειρίδιο του ECMWF, τα προϊόντα reanalysis είναι δυνατόν να υπερεκτιμούν μικρά ποσά υετού και να υποεκτιμούν τα μεγάλα ποσά (ECMWF Technical Memo, 2025). Η συμπεριφορά αυτή φαίνεται να είναι συμβατή και με τα

αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, όπου οι πιο υγρές περιοχές, όπως τα Ιωάννινα και η Αλεξανδρούπολη, παρουσιάζουν μεγαλύτερες αποκλίσεις από τις μετρήσεις και μεγαλύτερες τιμές σφάλματος σε σχέση με τις ξηρότερες περιοχές, όπως η Αθήνα και το Ηράκλειο. Μια πιθανή ερμηνεία είναι ότι στις υγρότερες περιοχές καταγράφεται μεγαλύτερος αριθμός επεισοδίων υετού, μικρής έως και μέτριας έντασης, τα οποία εφόσον υπερεκτιμώνται συστηματικά κατά την εξαγωγή των δεδομένων reanalysis, οδηγούν αθροιστικά σε αυξημένα σφάλματα.

2.4 Μεθοδολογία

2.4.1 Παραγοντική Ανάλυση (Factor Analysis)

Στην παρούσα μελέτη εφαρμόζεται η μέθοδος της παραγοντικής ανάλυσης (Factor Analysis), με σκοπό τη διερεύνηση του υετού και την ομαδοποίηση των μεταβλητών σε ένα αριθμό παραγόντων οι οποίοι θα απεικονίζουν τα καθεστώτα υετού που θα προκύψουν. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει τη μείωση της διάστασης των δεδομένων εντοπίζοντας παράγοντες που εξηγούν τα κοινά χαρακτηριστικά των παρατηρούμενων μεταβλητών. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού IBM SPSS Statistics. Για την εξαγωγή των παραγόντων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος κύριων συνιστωσών (Principal Component Analysis). Η μαθηματική διατύπωση της παραγοντικής ανάλυσης αρχικά μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

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

όπου:

x_i : αρχική μεταβλητή

F_j : κοινοί παράγοντες

g_{im} : φορτία των παραγόντων (factor loadings), όπου εκφράζουν τον βαθμό συσχέτισης της μεταβλητής x_i με τον παράγοντα F_j .

Το e_i είναι το μέρος της μεταβλητής x_i που δεν μπορεί να ερμηνευτεί από τους m παράγοντες και ονομάζεται ιδιαιτερότητα (specificity) (Manly, 1986).

Έπειτα, η εφαρμογή της μεθόδου περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. Εφαρμογή Ανάλυσης σε Κύριες Συνιστώσες
 - Κανονικοποίηση των αρχικών p μεταβλητών, ώστε να έχουν μέση τιμή μηδέν και διακύμανση ίση με τη μονάδα.
 - Υπολογισμός του πίνακα συσχετίσεων των αρχικών μεταβλητών

- Υπολογισμός των ιδιοτιμών $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ του πίνακα συσχετίσεων και των αντίστοιχων ιδιοδιανυσμάτων $b_1, b_2, \dots, b_p$. Η ιδιοτιμή λ_j αντιπροσωπεύει τη διακύμανση της j -οστής κύριας συνιστώσας και τα στοιχεία του ιδιοδιανύσματος b_j αποτελούν τους συντελεστές, όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$PC_j = b_{j1}X_1 + b_{j2}X_2 + \dots + b_{jp}X_p \quad (2.7)$$

2. Υπολογισμός των X_i ως γραμμικό συνδυασμό των κυρίων συνιστωσών,

$$X_i = b_{i1}PC_1 + b_{i2}PC_2 + \dots + b_{ip}PC_p \quad (2.8)$$

3. Διατήρηση m κυρίων συνιστωσών,

$$X_i = b_{i1}PC_1 + b_{i2}PC_2 + \dots + b_{im}PC_m + e_i \quad (2.9)$$

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

4. Μετατροπή των κυρίων συνιστωσών PC_j σε παράγοντες διαιρώντας τις με την τυπική απόκλισή τους, η οποία είναι $\sqrt{\lambda_j}$, ώστε να έχουν μέση τιμή μηδέν και διακύμανση ίση με τη μονάδα. Τότε η εξίσωση 2.9 μετασχηματίζεται σε:

$$X_i = a_{i1}F_1 + a_{i2}F_2 + \dots + a_{im}F_m + e_i \quad (2.10)$$

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

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

$$X_i = g_{i1}F_1^* + g_{i2}F_2^* + \dots + g_{im}F_m^* + e_i \quad (2.11)$$

όπου οι νέοι παράγοντες F_j^* καλούνται περιστραμμένοι παράγοντες (rotated factors).

Ο αριθμός των m παραγόντων οι οποίοι θα διατηρηθούν, ορίζεται βάση ορισμένων κριτηρίων, όπου ο κύριος κανόνας στην εφαρμογή των κριτηρίων είναι πως ο αριθμός των παραγόντων που θα διατηρηθούν θα πρέπει να είναι τέτοιος ώστε το αποτελέσματα που προκύπτει να είναι όσο το δυνατόν καλύτερα ερμηνεύσιμο από φυσική άποψη (Bartzokas and Metaxas, 1993). Για την ερμηνεία των παραγόντων χρησιμοποιήθηκε ως όριο (factor loadings)

τιμή ίση με 0.75. Τιμές loadings μεγαλύτερες ή ίσες του ορίου αυτού θεωρούνται ως ισχυρές συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών και των αντίστοιχων παραγόντων.

Στην παρούσα εργασία, η εφαρμογή της παραγοντικής ανάλυσης επιτρέπει την ανάδειξη βασικών προτύπων μεταβλητότητας του υετού και τη μείωση της πολυπλοκότητας των δεδομένων μέσω της ομαδοποίησης μεταβλητών με παρόμοια συμπεριφορά.

2.4.2 Τμηματική Παλινδρόμηση (Segmented Regression)

Για τη διερεύνηση πιθανών αλλαγών στη χρονική εξέλιξη του ετήσιου υετού, εφαρμόστηκε η μέθοδος της τμηματικής γραμμικής παλινδρόμησης (segmented regression). Η μέθοδος αυτή επιτρέπει τον εντοπισμό σημείων καμπής (breakpoints ή Change-points), στα οποία η σχέση μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής (υετός) και της ανεξάρτητης μεταβλητής (χρόνος) μεταβάλλεται και πιο συγκεκριμένα, αλλάζει η έως εκείνη τη χρονική τιμή ακολουθούμενη τάση.

Η εκτίμηση των παραμέτρων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της συνάρτησης segmented του πακέτου segmented στο περιβάλλον της R. Αρχικά, προσαρμόστηκε ένα απλό γραμμικό μοντέλο της μορφής:

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon_t \quad (2.12)$$

όπου:

y_t : η τιμή του υετού στη χρονική στιγμή t
 t : η χρονική μεταβλητή (έτος)
 β_0 : ο σταθερός όρος του μοντέλου (intercept)
 β_1 : η κλίση της γραμμικής τάσης του υετού ως προς τον χρόνο
 ε_t : σφάλμα-θόρυβος τη χρονική στιγμή t

Στη συνέχεια, το μοντέλο επεκτείνεται και εφαρμόζεται η τμηματική παλινδρόμηση, επιτρέποντας την ύπαρξη ενός ή περισσότερων σημείων καμπής, στα οποία η κλίση της γραμμής αλλάζει. Για τον ιδανικό αριθμό των σημείων καμπής, μπορεί να διερευνηθεί βάσει τεστ αξιολογήσεων. Το μοντέλο πλέον μπορεί να εκφραστεί ως:

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2(t - \psi)_+ + \varepsilon_t \quad (2.13)$$

όπου:

y_t : η τιμή του υετού στη χρονική στιγμή t
 t : η χρονική μεταβλητή (έτος)
 β_0 : ο σταθερός όρος του μοντέλου (intercept)
 β_1 : η κλίση της τάσης πριν το σημείο καμπής
 β_2 : η μεταβολή της κλίσης μετά το σημείο καμπής

ψ : το σημείο καμπής στο χρόνο (breakpoint)

$(t-\psi)_+$: ισούται με μηδέν για $t \leq \psi$ και ενεργοποιείται μόνο όταν λαμβάνει θετικές τιμές $t > \psi$, επιτρέποντας στο μοντέλο να αποδώσει τη μεταβολή της κλίσης μετά το σημείο αυτό

ϵ_t : σφάλμα-θόρυβος τη χρονική στιγμή t

Η μέθοδος της τμηματικής παλινδρόμησης επιτρέπει την αναγνώριση περιόδων με διαφορετική τάση, προσφέροντας μια πιο αντιπροσωπευτική περιγραφή της χρονικής εξέλιξης των δεδομένων σε σχέση με ένα απλό γραμμικό μοντέλο. Η μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε κλιματικές έρευνες με χρονοσειρές, όπου είναι πιθανές οι αλλαγές στη διαχρονική πορεία των δεδομένων, όπως έχει εφαρμοστεί και εκτενώς στη διεθνή βιβλιογραφία για την ανίχνευση αλλαγών τάσης σε διάφορες σειρές δεδομένων (π.χ. Muggeo, 2003; Muggeo, 2008).

2.4.3 Mann-Kendall Test

Για τον εντοπισμό τάσεων στις χρονοσειρές του υετού χρησιμοποιήθηκε ο μη παραμετρικός έλεγχος Mann-Kendall. Το συγκεκριμένο τεστ εφαρμόζεται ευρέως στην ανάλυση περιβαλλοντικών δεδομένων, καθώς είναι μη παραμετρικό, δηλαδή δεν απαιτεί τα δεδομένα να ακολουθούν την κανονική κατανομή (υπόθεση κανονικότητας των δεδομένων) και είναι ανθεκτικό (δεν επηρεάζεται) στην παρουσία ακραίων τιμών (Mann, 1945; Kendall, 1975). Συνεπώς, ο μη παραμετρικός έλεγχος Mann-Kendall ενδείκνυται ιδιαίτερα για υδρολογικά και κλιματικά δεδομένα, όπως οι χρονοσειρές υετού, όπου συχνά παρατηρούνται μη κανονικές κατανομές και ακραίες τιμές. Η βασική ιδέα του ελέγχου είναι η εξέταση όλων των δυνατών ζευγών παρατηρήσεων και ο υπολογισμός της σχετικής τους διαφοράς. Το στατιστικό μέγεθος του ελέγχου ορίζεται ως:

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \text{sgn}(x_k - x_j) \quad (2.14)$$

με:

n : το πλήθος των δεδομένων

x_j, x_k : είναι τιμές της χρονοσειράς στις χρονικές στιγμές j και k αντίστοιχα (με $k > j$)

sgn : το πρόσημο της διαφοράς μεταξύ δύο τιμών,

όπου η συνάρτηση προσήμου δίνεται από την έκφραση:

$$sgn(x_k - j) = \begin{cases} +1 & \text{αν } x_k > x_j \\ 0 & \text{αν } x_k = x_j \\ -1 & \text{αν } x_k < x_j \end{cases} \quad (2.15)$$

Η τιμή του στατιστικού S υποδηλώνει την κατεύθυνση της τάσης. Θετικές τιμές του S υποδηλώνουν αυξητική τάση, ενώ αρνητικές τιμές υποδηλώνουν φθίνουσα τάση. Για μεγάλα δείγματα τιμών ($n > 10$), όπως στην παρούσα εργασία, υπολογίζεται και η διακύμανση του S μέσω του:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum t(t-1)(2t+5)}{18} \quad (2.16)$$

όπου:

n : το πλήθος των δεδομένων

t : ο αριθμός των δεδομένων με ίδια τιμή.

Ακολούθως, υπολογίζεται η μεταβλητή Z αναλόγως της τιμής του S, ώστε να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για τον έλεγχο της στατιστικής σημαντικότητας:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{αν } S > 0 \\ 0 & \text{αν } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{αν } S < 0 \end{cases} \quad (2.17)$$

Έπειτα, η τιμή της μεταβλητής Z χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του p-value, όπου εκφράζει την πιθανότητα η παρατηρούμενη τάση να οφείλεται στην τύχη αποτυπώνοντας την στατιστική σημαντικότητα της τάσης. Μεγάλες θετικές ή αρνητικές τιμές του Z, αντιστοιχούν σε μικρότερες τιμές p-value και συνεπώς σε ισχυρότερη στατιστική σημαντικότητα της τάσης. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε επίπεδο εμπιστοσύνης (confidence level) 95% ($p < 0.05$) για τον εντοπισμό στατιστικά σημαντικών τάσεων.

2.4.4 Theil-Shen Estimator

Για την εκτίμηση του μεγέθους της τάσης χρησιμοποιήθηκε ο εκτιμητής Theil–Sen, ο οποίος είναι ιδιαίτερα ανθεκτικός σε ακραίες τιμές και δεν επηρεάζεται σημαντικά από μη κανονικές κατανομές (Theil, 1950 · Sen, 1968), γεγονός που τον καθιστά κατάλληλο για την ανάλυση κλιματικών δεδομένων. Στην παρούσα μελέτη, ο εκτιμητής χρησιμοποιείται συμπληρωματικά με τον έλεγχο Mann–Kendall, παρέχοντας ποσοτική εκτίμηση της έντασης της τάσης που εντοπίζεται. Ο εκτιμητής αυτός βασίζεται στον υπολογισμό της διάμεσης τιμής

των κλίσεων μεταξύ όλων των δυνατών ζευγών παρατηρήσεων. Η εκτίμηση της κλίσης δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \text{median} \left(\frac{x_k - x_j}{k - j} \right) \quad (2.18)$$

όπου:

x_j, x_k : είναι τιμές της χρονοσειράς στις χρονικές στιγμές j και k αντίστοιχα (με $k > j$).

2.4.5 Δείκτες (Indices) για την ανάλυση των ακραίων φαινομένων υετού

Για την ανάλυση των ακραίων φαινομένων υετού χρησιμοποιήθηκαν οι δείκτες R95p και R95pTOT, οι οποίοι βασίζονται στο σύνολο δεικτών του ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices), το οποίο έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού (World Meteorological Organization – WMO) σε συνεργασία με το World Climate Research Programme (WCRP), και αποτελεί διεθνώς καθιερωμένο πρότυπο για την ανάλυση των κλιματικών ακραίων. Επίσης, με βάση τους δύο επίσημους δείκτες του ETCCDI που αναφέρθηκαν μόλις, χρησιμοποιήθηκε και ο δείκτης R95pDays. Οι υπολογισμοί έχουν πραγματοποιηθεί σε δεδομένα σε ετήσια βάση, που προέκυψαν από το άθροισμα του ημερήσιου ακραίου υετού μέσα στο υδρολογικό έτος, όταν αυτός έχει χαρακτηριστεί ως ακραίος βάσει της εφαρμογής του 95^{ου} εκατοστημορίου ως κατώφλι σε κάθε πλεγματικό σημείο.

Για τον προσδιορισμό ενός ακραίου επεισοδίου υετού χρησιμοποιούνται ημερήσιες τιμές και η διερεύνηση πραγματοποιείται για κάθε πλεγματικό σημείο. Ως κριτήριο για τον ορισμό ενός ακραίου επεισοδίου έχει επιλεγεί ένα κατώφλι του ημερήσιου ύψος υετού, η τιμή του οποίου αντιστοιχεί στο 95^ο εκατοστημόριο (percentile) της κατανομής των ημερήσιων τιμών για κάθε πλεγματικό σημείο χωριστά. Έχοντας προσδιορίσει την τιμή του κατωφλίου, υπολογίζονται οι εξής δείκτες.

Ο δείκτης R95pDays ο οποίος εκφράζει τον αριθμό των ημερών μέσα στο υδρολογικό έτος κατά τις οποίες ο ημερήσιος υετός υπερβαίνει το κατώφλι του 95ου εκατοστημορίου της κατανομής του ημερήσιου ύψος υετού και περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$R95pDays = \sum I(x_i > P_{95}) \quad (2.19)$$

όπου:

x_i : ημερήσιος υετός (mm)

P_{95} : 95ο εκατοστημόριο του υετού

I : συνάρτηση ένδειξης (1 αν $x_i > P_{95}$, αλλιώς 0).

Ο δείκτης $R95p$ ο οποίος εκφράζει το συνολικό ύψος νετού μέσα στο υδρολογικό έτος που καταγράφεται από τις ημέρες όπου ο νετός υπερβαίνει το 95ο εκατοστημόριο,

$$R95p = \sum_{x_i > P_{95}} x_i \quad (2.20)$$

όπου:

x_i : ημερήσιος νετός (mm)

P_{95} : 95ο εκατοστημόριο του νετού

Ο δείκτης $R95pTOT$ εκφράζει το ποσοστό (%) συμβολής των επεισοδίων-ημερών ακραίου νετού στο συνολικό ύψος νετού μέσα στο υδρολογικό έτος που οφείλεται σε ακραία γεγονότα ή διαφορετικά το ποσοστό του συνολικού νετού που οφείλεται σε ακραία γεγονότα νετού,

$$R95pTOT = \frac{R95p}{PRCPTOT} \times 100 \quad (2.21)$$

όπου:

$R95p$: συνολικό ύψος ακραίου νετού (mm)

$PRCPTOT$: συνολικό ύψος νετού (mm)

Κεφάλαιο 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

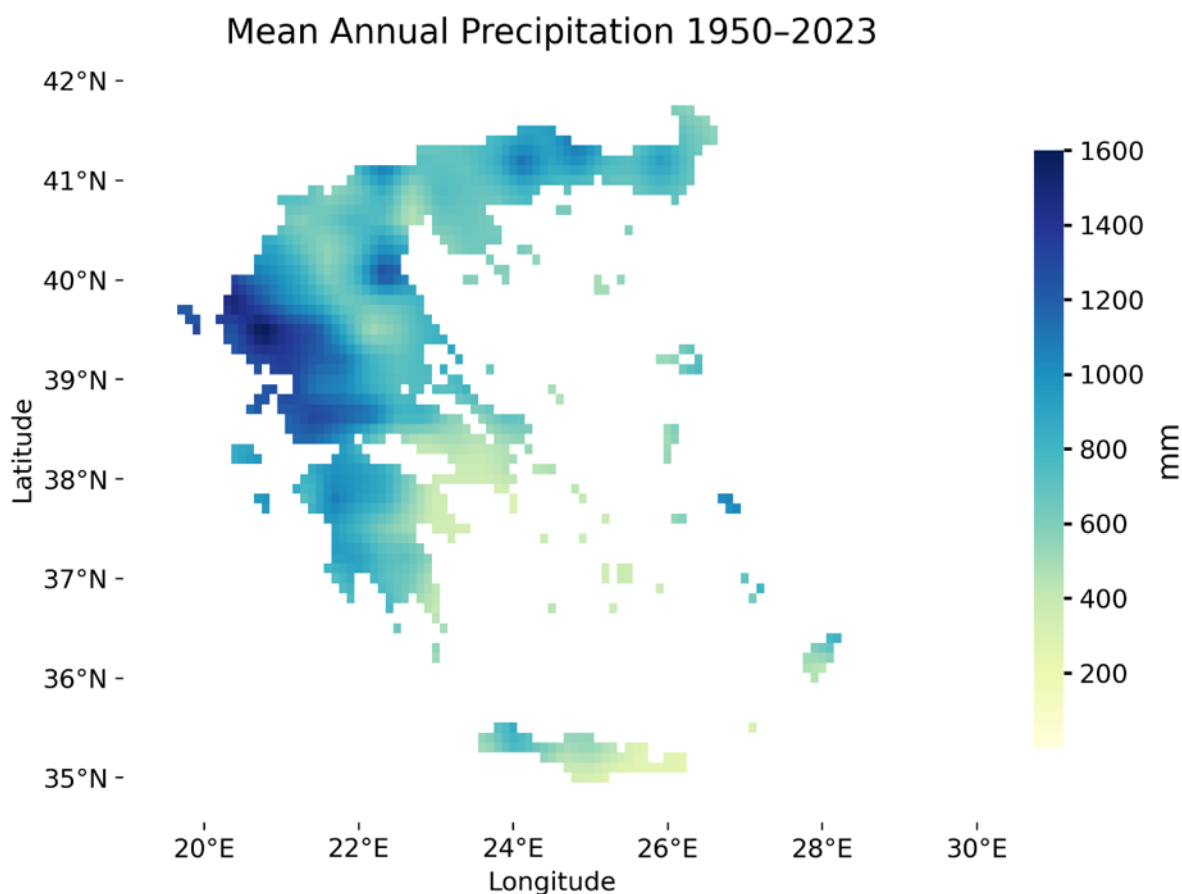
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης της χωρικής κατανομής και χρονικής εξέλιξης του υετού στον ελλαδικό χώρο από το 1950 έως το 2024 (με βάση τα υδρολογικά έτη, 01/09/1950-31/08/2024). Αρχικά, μέσω της παραγοντικής ανάλυσης διερευνάται η χωρική οργάνωση του υετού. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται κλιματολογική ανάλυση με σκοπό την αποτύπωση της χωρικής κατανομής του υετού. Ακολούθως, εξετάζονται οι τάσεις του υετού, με στόχο την ανίχνευση πιθανών μεταβολών στο καθεστώς του. Τέλος, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην ανάλυση των ακραίων τιμών του υετού, μέσω κατάλληλων δεικτών που περιγράφουν τη συχνότητα, την ένταση και τη σχετική τους συμβολή στο συνολικό υετό. Η συνδυαστική προσέγγιση που επιχειρείται μέσω των παραπάνω αναλύσεων, επιτρέπει την ολοκληρωμένη κατανόηση της εξέλιξης του υετού στον ελλαδικό χώρο, τόσο ως προς το συνολικό ύψος όσο και σε επίπεδο ακραίων επεισοδίων.

3.1 Η χρονική εξέλιξη του υετού στην Ελλάδα για τη χρονική περίοδο μελέτης (1950-2024)

Σε αυτό το πρώτο μέρος του κεφαλαίου παρουσιάζεται η κλιματολογική ανάλυση του υετού στον ελλαδικό χώρο (σε υδρολογική βάση), με στόχο την αποτύπωση της μέσης κατάστασης τόσο σε ότι αφορά τη χωρική κατανομή του υετού σε διάφορες κλίμακες. Η διερεύνηση των βασικών χαρακτηριστικών του υετού αποτελεί απαραίτητο στάδιο για την κατανόηση του υδρολογικού καθεστώτος. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε ετήσια, 25-ετή, 10-ετή, εποχική, και μηνιαία βάση, προκειμένου να αναδειχθούν τα βασικά πρότυπα κατανομής του υετού και η εποχική τους διαφοροποίηση.

3.1.1 Χωρική κατανομή του νετού

Η χωρική κατανομή της μέσης κλιματολογικής τιμής του ετήσιου ύψους του νετού για την περίοδο 1950 – 2023 πάνω από τον χερσαίο ελλαδικό χώρο, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1 Χωρική κατανομή της μέσης κλιματολογικής τιμής του ετήσιου ύψους νετού στον χερσαίο Ελλαδικό χώρο κατά την περίοδο 1950-2023 (σε υδρολογικά έτη).

Πίνακας 3.1 Ελάχιστες και μέγιστες κλιματολογικές τιμές καθώς και η μέση τιμή νετού από τους ετήσιους μέσους όρους ανά 25ετία από το 1950 έως το 2023

	Minimum (mm)	Maximum (mm)	Mean Value (mm)
1950-2023	249.88	1588.43	782.95

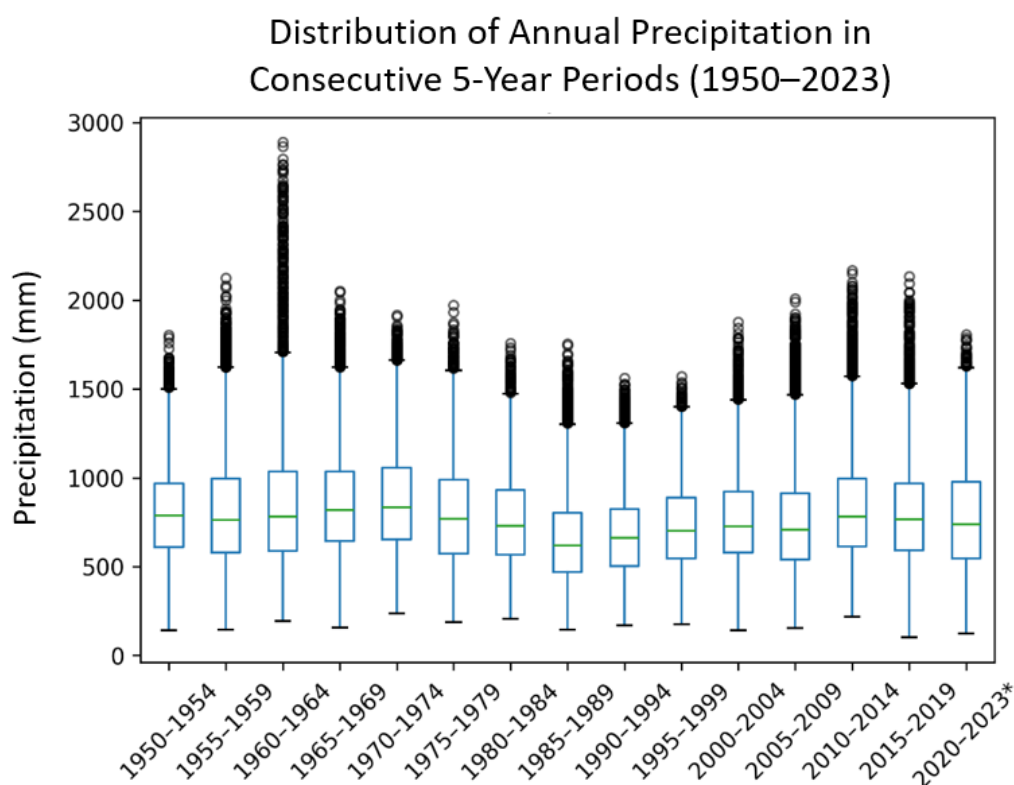
Κυρίαρχο χαρακτηριστικό της γεωγραφικής κατανομής του νετού, κυρίως πάνω από την ηπειρωτική χώρα, είναι η έντονη βαθμίδα με το γεωγραφικό μήκος, με τις υψηλές τιμές του αθροιστικού νετού στα δυτικά και βαθμιαία μείωσή του προς τα ανατολικά. Αυτή η από δυσμίας προς ανατολάς βαθμίδα στην κατανομή του νετού, μπορεί να αποδοθεί κυρίως σε δύο παράγοντες. Ο πρώτος συνδέεται με τη γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας, όπου τα

κυκλωνικά συστήματα (υφέσεις) των μέσων γεωγραφικών έχουν γενική κατεύθυνση κίνησης από τα δυτικά προς τα ανατολικά και ο δεύτερος παράγοντας σχετίζεται με την επίδραση της ορογραφίας μέσω του μηχανισμού της εξαναγκασμένης ανύψωσης (ορογραφική ανύψωση, *orographic uplift*). Οι υφέσεις κινούμενες προς τα ανατολικά και έχοντας εμπλουτιστεί με υδρατμούς κατά τη διεύλευση τους πάνω από την Αδριατική Θάλασσα και το Ιόνιο Πέλαγος, συναντούν την οροσειρά της Πίνδου και υποχρεώνονται σε ανύψωση. Η επακόλουθη ψύξη και συμπύκνωση των υδρατμών έχει σαν αποτέλεσμα την εναπόθεση μεγάλων ποσοτήτων υετού στην προσήνεμη πλευρά του ορεινού όγκου (ομβροπλευρά). Στην υπήνεμη πλευρά (ομβροσκιά) ο αέρας είναι ξηρότερος καθώς έχει ήδη εναποθέσει μεγάλο μέρος της υγρασίας του και ταυτόχρονα κατερχόμενος θερμαίνεται, με αποτέλεσμα να καταγράφονται μειωμένα ύψη υετού. Εκτός από τον κύριο ηπειρωτικό κορμό της χώρας, αντίστοιχη δυτική – ανατολική βαθμίδα στη γεωγραφική κατανομή του υετού από την επίδραση της ορογραφίας, παρατηρείται και στην Πελοπόννησο λόγω των ορεινών όγκων των Μαίναλου, Ταύγετου και Πάρνωνα, και στην Κρήτη από την παρουσία των λευκών Ορέων και του Ψηλορείτη. Έτσι, τα υψηλότερα ποσά υετού (> 1200 mm, με μέγιστη τιμή τα 1588.4 mm) παρατηρούνται στις δυτικές περιοχές και πιο συγκεκριμένα στην περιοχή της Ηπείρου, των νησιών του Βορείου Ιονίου και τη δυτική Στερεά Ελλάδα. Αυξημένο εμφανίζεται το ετήσιο ύψος του υετού, κυμαινόμενο μεταξύ 800 και 1000 mm και στη δυτική Πελοπόννησο. Αντίθετα, οι ελάχιστες τιμές του υετού (< 400 mm, με ελάχιστη τιμή ~250 mm), σε ετήσια πάντα βάση, παρατηρούνται στις υπήνεμες περιοχές της Πίνδου, στην Ανατολική Στερεά Ελλάδα, ανατολική Πελοπόννησο, ανατολική Κρήτη, Κυκλάδες και γενικά τα νησιά του κεντρικού και νότιου Αιγαίου. Ο σημαντικός ρόλος της τοπογραφίας και συγκεκριμένα της ορογραφίας, στη διαμόρφωση της χωρικής κατανομής του υετού στον ελλαδικό χώρο αναδεικνύεται επίσης και από άλλα μέγιστα. Παράδειγμα, τα αυξημένα ύψη υετού στην περιοχή του Ολύμπου και στην Ανατολική Μακεδονία και Θράκη, όπου ο υετός αυξάνει όσο απομακρυνόμαστε από τις ακτές του Αιγαίου προς τους ορεινούς όγκους της οροσειράς της Ροδόπης. Σημαντικό ρόλο έχει και η έντονη παρουσία του υδάτινου στοιχείου (θάλασσα) και η εναλλαγή ξηράς και θάλασσας που χαρακτηρίζει τον ελληνικό χώρο καθώς τροφοδοτεί με υγρασία, μέσω της εξάτμισης, τα διερχόμενα συνοπτικά συστήματα. Έτσι μπορούν να εξηγηθούν, τα αυξημένα ύψη υετού που εμφανίζονται στα νησιά του ανατολικού Αιγαίου, σε σχέση με την ανατολική ακτή της ηπειρωτικής Ελλάδος και τα νησιά του κεντρικού Αιγαίου, ενώ μελέτες διαπίστωσαν επίσης αυξημένο υετό στις ακτές της Μικράς Ασίας (π.χ. Hatzianastassiou et al., 2008; Lolis, 2012).

Πανομοιότυπη γεωγραφική κατανομή του υετού στον Ελλαδικό χώρο όπου αποτυπώνονται τα κύρια χαρακτηριστικά που συζητήθηκαν προηγούμενα, έχει αναφερθεί και σε άλλες μελέτες, ορισμένες εν των οποίων χρησιμοποιούν μετρήσεις υετού σε σταθμούς επιφανείας (π.χ. Lolis, 2012 ; Feidas et al., 2013), άλλες βασίζονται σε δορυφορικά δεδομένα (π.χ. Hatzianastassiou et al., 2008) ή σε προιόντα reanalysis (Varlas et al., 2022). Επιπλέον, οι εργασίες αυτές αναφέρονται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, οι οποίες είναι μικρότερης διάρκειας σε σχέση με την παρούσα εργασία.

3.1.2 Διερεύνηση της διαχρονικής μεταβολής του υετού

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η αποτύπωση της διαχρονικής μεταβολής του ετήσιου ύψους του υετού (τιμές των 1279 πλεγματικών σημείων) σε όλη τη χρονική περίοδο μελέτης (1950 – 2023), χρησιμοποιήθηκε αναπαράσταση μέσω θηκογραμμάτων (boxplots) (Σχήμα 3.2). Επιλέχθηκε η χρήση των θηκογραμμάτων καθώς αυτά εμπεριέχουν συμπυκνωμένη πολλαπλή στατιστική πληροφορία ώστε να παρουσιαστούν περιγραφικές στατιστικές παράμετροι όπως: η διάμεσος, η ελάχιστη τιμή, καθώς και ακραίες τιμές (outliers).



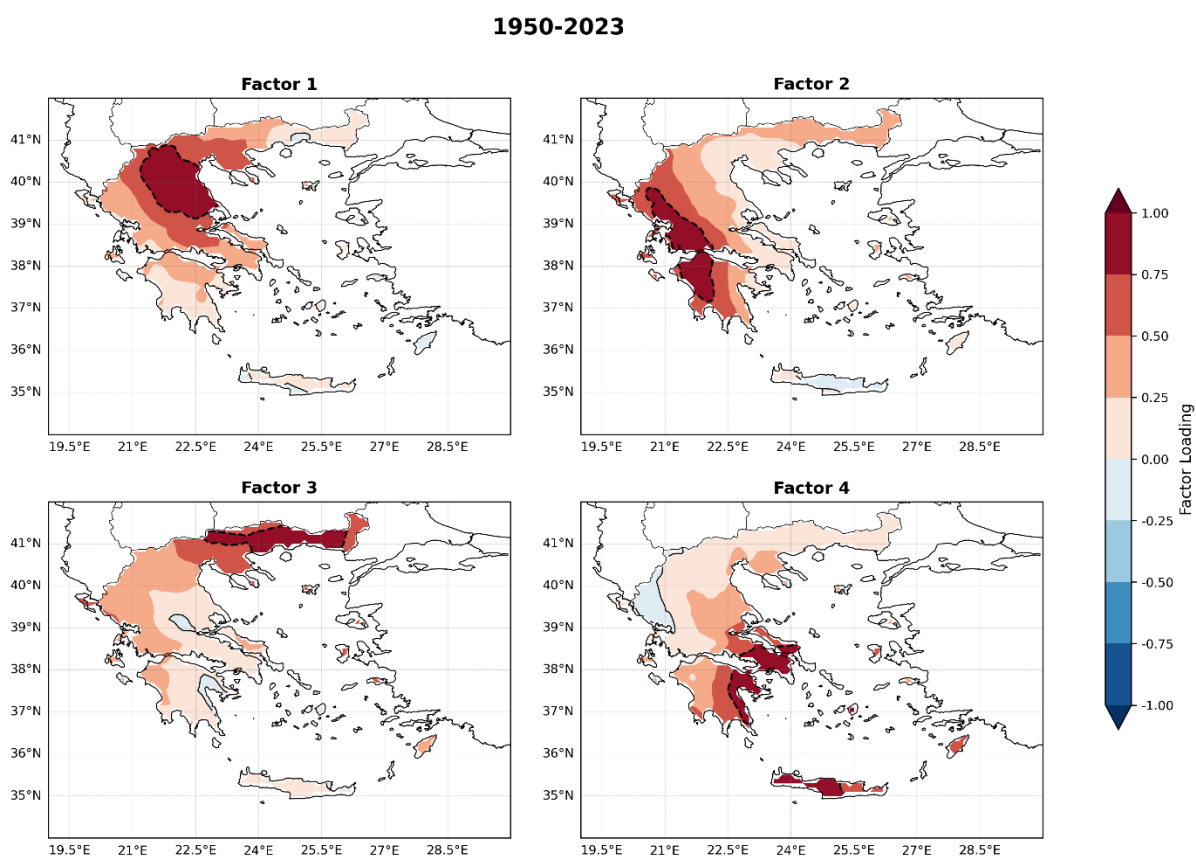
Σχήμα 3.2 Διαχρονική μεταβολή του ετήσιου ύψους υετού (σε mm) των 1279 πλεγματικών σημείων με χρήση θηκογραμμάτων (boxplots) για κάθε 5ετία της περιόδου μελέτης 1950-2023 (κάθε υδρολογικό έτος αναφέρεται με το έτος έναρξης του), υπολείπεται ένα έτος στην τελευταία 5ετία *.

Από την πρώτη εικόνα των ετήσιων τιμών υετού ανά 5ετίες, το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι παρά τη σχετική εξομάλυνση των δεδομένων με αυτόν τον τρόπο απεικόνισης, διακρίνονται τάσεις μεταβολής στη διαχρονική εξέλιξη του υετού με επίκεντρο τη δεκαετία του 1980. Συγκεκριμένα, με βάση τη διαχρονική μεταβολή της διαμέσου, παρατηρείται πως κατά τις πρώτες δεκαετίες της περιόδου μελέτης το ετήσιο ύψος υετού είναι αρχικά σταθερό με μία τάση αύξησης μέχρι τα μέσα του '70. Στη συνέχεια, μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του '90, εμφανίζει μία σαφή τάση μείωσης, η οποία ακολούθως αναστρέφεται, ενώ μετά το 2010 φαίνεται να σταθεροποιείται στα ίδια επίπεδα.

3.1.3 Προσδιορισμός των κύριων προτύπων διαχρονικής διακύμανσης του υετού

Η ανάλυση της χωρικής κατανομής του ετήσιου ύψους του υετού αποκάλυψε ευδιάκριτα γεωγραφικά χαρακτηριστικά. Με στόχο να προσδιοριστούν τα χωρικά πρότυπα του υετού όχι μόνο βάσει της μέσης κλιματολογικής τιμής του ετήσιου ύψους του, αλλά λαμβάνοντας υπόψη και τη διαχρονική μεταβολή του, χρησιμοποιήθηκε η παραγοντική ανάλυση (factor analysis). Επιπρόσθετα, η χρήση της παραγοντικής ανάλυσης διασφαλίζει της αντικειμενική ταξινόμηση των περιοχών που εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά στο χρόνο (διαχρονική μεταβολή).

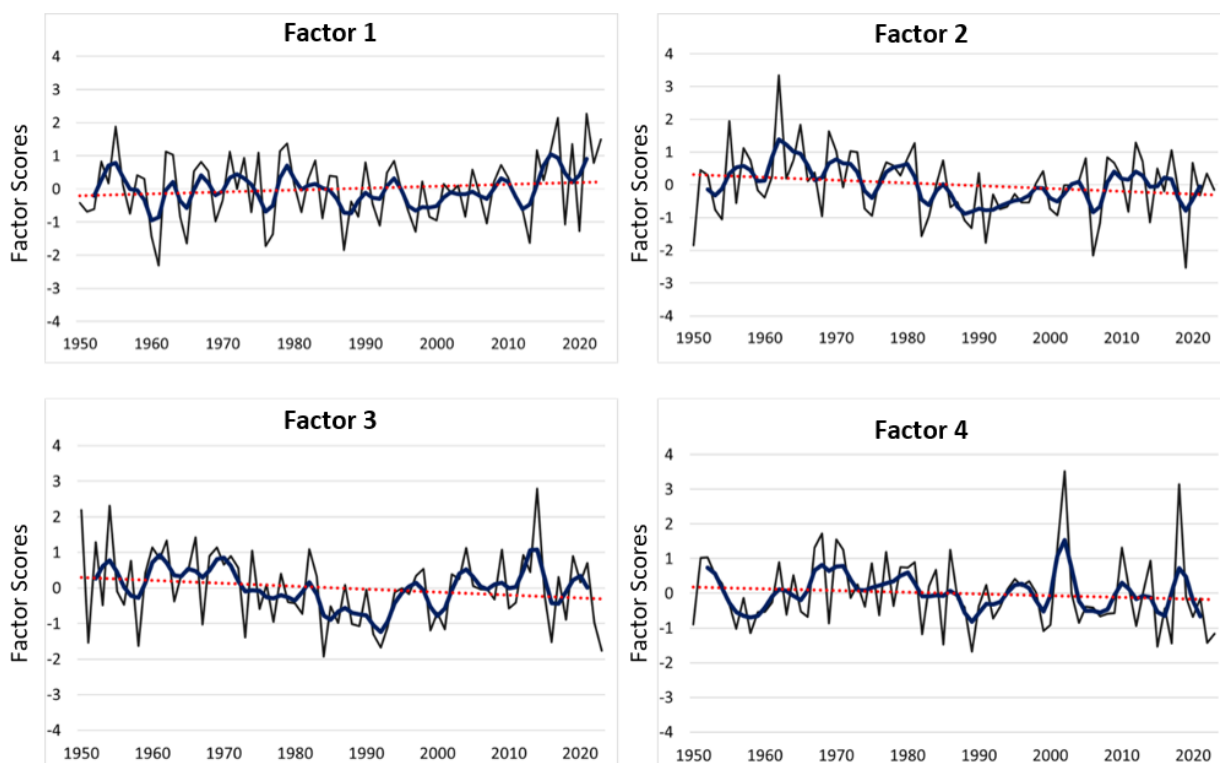
Η παραγοντική ανάλυση (factor analysis) εφαρμόστηκε με τη χρήση του λογισμικού IBM SPSS, στις χρονοσειρές του ετήσιου ύψους του υετού των 1279 πλεγματικών σημείων που καλύπτουν την περιοχή μελέτης. Η τιμή του ορίου των φορτίων (loadings) ορίστηκε στο 0.75 και αποτυπώνεται στους χάρτες της χωρικής κατανομής τους με τη διακεκομμένη καμπύλη που περικλείει τις τιμές πάνω από αυτό το όριο, ώστε να αναδειχθούν οι ισχυρότερες χωρικές συσχετίσεις με τις περιοχές στις οποίες αντιστοιχεί ο κάθε κύριος τύπος διαχρονικής διακύμανσης (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3 Αποτελέσματα της Παραγοντικής Ανάλυσης- *S mode*: χωρική κατανομή των φορτίων (loadings) των τεσσάρων παραγόντων. Η διακεκομμένη γραμμή (---) αντιστοιχεί στην ισοπληθή καμπύλη του ορίου των 0.75 των φορτίων όριο.

Οι τέσσερις (4) παράγοντες που προέκυψαν, αντιπροσωπεύουν διακριτές γεωγραφικές περιοχές με παρόμοια χρονική συμπεριφορά του υετού κατά την περίοδο μελέτης και εξηγούν συνολικά το 83.32% της συνολικής διακύμανσης του υετού στην Ελλάδα. Το αυξημένο ποσοστό υποδηλώνει πως το μεγαλύτερο μέρος της πληροφορίας των χρονοσειρών του υετού περιγράφεται από τους τέσσερις παράγοντες. Ο πρώτος παράγοντας εξηγεί το 23.56% της συνολικής διακύμανσης, ενώ ο δεύτερος το 21.49%, επιβεβαιώνοντας τη σημαντική συμβολή τους στη διαμόρφωση της συνολικής αποτύπωσης. Οι τρίτος και τέταρτος παράγοντας συμβάλλουν επιπλέον κατά 19.17% και 19.10% αντίστοιχα, οδηγώντας σε υψηλό αθροιστικό ποσοστό της συνολικής διακύμανσης που ερμηνεύεται από τους τέσσερις παράγοντες. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι η διαχρονική μεταβολή του υετού στον ελλαδικό χώρο μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά μέσω αυτών των τεσσάρων παραγόντων.

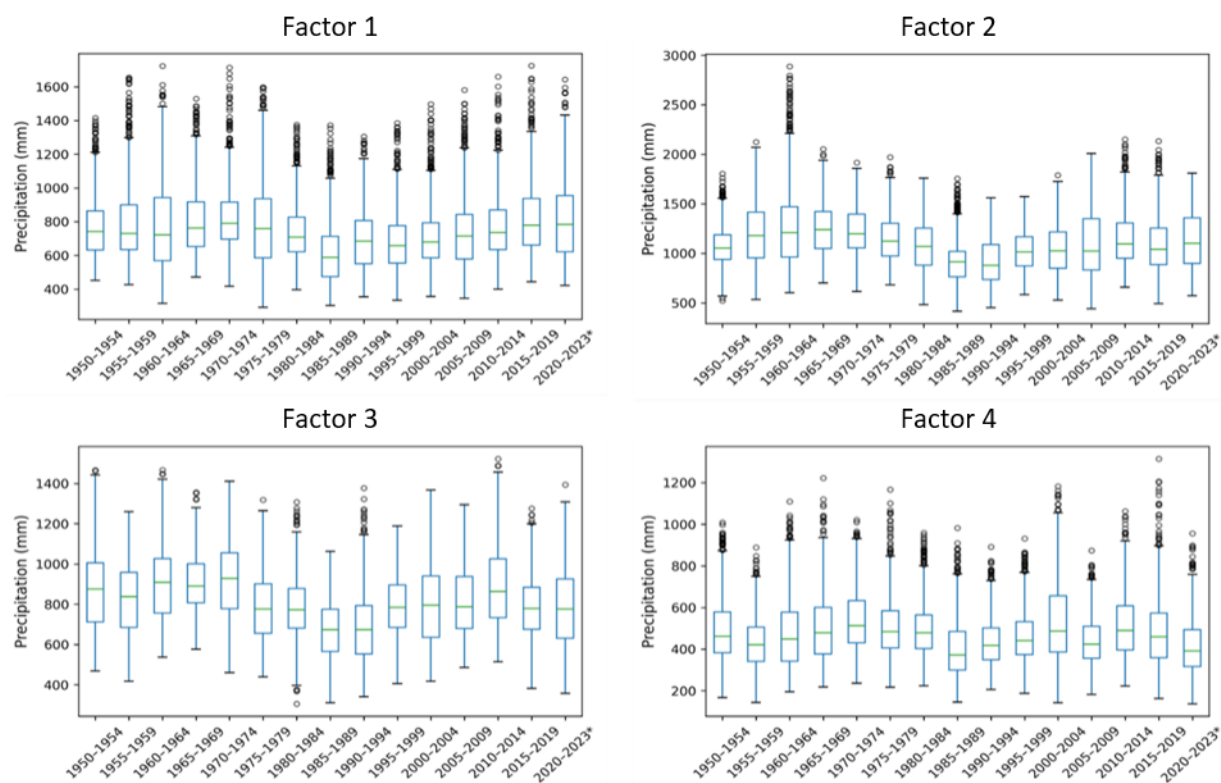
Συγκεκριμένα, ο πρώτος παράγοντας παρουσιάζει υψηλές τιμές κυρίως στη Δυτική Μακεδονία και μεγάλο μέρος της Θεσσαλίας, υποδεικνύοντας την ύπαρξη ενός διακριτού καθεστώτος υετού στις περιοχές αυτές. Ο συγκεκριμένος παράγοντας περιλαμβάνει τις περιοχές που βρίσκονται στην υπήνεμη πλευρά της οροσειράς της Πίνδου (ομβροσκιά) και χαρακτηρίζονται από σαφώς χαμηλότερα ύψη υετού σε σχέση με την προσήνεμη πλευρά. Εμπεριέχει όμως και το τοπικό μέγιστο στην περιοχή του Ολύμπου και στα Πιέρεια όρη. Ο δεύτερος παράγοντας εντοπίζεται στη Δυτική Ελλάδα. Περιλαμβάνει το δυτικό τμήμα της Ελληνικής Χερσονήσου και τα νησιά του Ιονίου Πελάγους δηλαδή τις πιο 'υγρές' περιοχές της χώρας καθώς εκεί καταγράφονται τα μεγαλύτερα ετήσια ύψη υετού (Σχήμα 3.1). Το δυτικό τμήμα της Πελοποννήσου, παρότι δέχεται μικρότερα ποσά υετού σε σχέση με τη Βορειοδυτική Ελλάδα και την Αιτωλοακαρνανία, ταξινομείται στον ίδιο παράγοντα λόγω του γεγονότος ότι ο υετός κυρίως υφειακής προέλευσης και τα συγκεκριμένα συστήματα συνήθως επηρεάζουν το σύνολο της Δυτικής Ελλάδας. Ο τρίτος παράγοντας εμφανίζεται στη βόρεια Ελλάδα και συγκεκριμένα καλύπτει την περιοχή της Ανατολικής Μακεδονίας και της Θράκης, αναδεικνύοντας ένα διακριτό χωρικό πρότυπο υετού. Ο παράγοντας αυτός επίσης συνδέεται με αυξημένα ποσά υετού και συμπίπτει με τοπικό μέγιστο της βορειοανατολικής Ελλάδας (Σχήμα 3.1). Μάλιστα, στην εν λόγω περιοχή εμφανίζονται αυξημένα ύψη υετού τόσο κατά την υγρή περίοδο του έτους λόγω της υφειακής δράσης, όσο και κατά την ξηρή περίοδο λόγω της ενισχυμένης στατικής αστάθειας και της επίδρασης της οροσειράς της Ροδόπης. Τέλος, ο τέταρτος παράγοντας εντοπίζεται κυρίως στην κεντρική και νότια και νησιωτική Ελλάδα, ενώ περικλείει τμήμα της ανατολικής ακτής της ηπειρωτικής Ελλάδας όπως η Ανατολική Στερεά Ελλάδα και η Ανατολική Πελοπόννησος. Συνολικά, η παραγοντική ανάλυση ανέδειξε περιοχές με παρόμοια μεταβολή του υετού κατά την 75-ετή περίοδο μελέτης, συμβάλλοντας στην καλύτερη κατανόηση και διάκριση της χωρικής κατανομής του υετού.



Σχήμα 3.4 Διαχρονική μεταβολή των factor scores για όλη την περίοδο μελέτης 1950-2023. Εξομαλυμένες τιμές με κινητούς μέσους όρους 5-ετών παριστάνονται με την έντονη καμπύλη. Η διακεκομμένη κόκκινη ευθεία αντιστοιχεί στη γραμμική τάση.

Η διαχρονική εξέλιξη των factor scores για τους τέσσερις παράγοντες παρουσιάζει τη χρονική μεταβολή των κύριων χωρικών προτύπων υετού κατά την περίοδο 1950–2023 (Σχήμα 3.4). Για την εξομάλυνση των χρονοσειρών εφαρμόστηκε σταθμισμένος κυλιόμενος μέσος όρος πέντε όρων (1–4–6–4–1), με στόχο την βέλτιστη ανάδειξη των μακροχρόνιων μεταβολών και αποτυπώνεται από την έντονη μπλε γραμμή. Παρατηρείται ότι όλοι οι παράγοντες εμφανίζουν σημαντικές διακυμάνσεις, με εναλλαγές θετικών και αρνητικών τιμών οι οποίες αντικατοπτρίζουν περιόδους με αυξημένο και μειωμένο υετό αντίστοιχα. Κοινό χαρακτηριστικό και στους τέσσερις παράγοντες αποτελεί η εμφάνιση μίας περιόδου με επικράτηση αρνητικών τιμών κατά τη δεκαετία του 1980 έως τις αρχές της δεκαετίας του '90, υποδηλώνοντας γενικευμένη μείωση του υετού στον ελλαδικό χώρο. Στη συνέχεια, παρατηρείται σταδιακή επαναφορά σε θετικές τιμές, ιδιαίτερα από τα τέλη της δεκαετίας του 1990 και μετά, γεγονός που υποδηλώνει τάση ανάκαμψης των επιπέδων του υετού. Η στατιστική σημαντικότητα των γραμμικών τάσεων των factor scores αξιολογήθηκε μέσω γραμμικής παλινδρόμησης και προέκυψε $p > 0.05$ (όχι στατιστικά σημαντικές) και για τους τέσσερις παράγοντες.

Για να διερευνηθεί περαιτέρω η χρονική μεταβολή του υετού για κάθε έναν από τους τέσσερις παράγοντες, παρουσιάζεται στη συνέχεια (Σχήμα 3.5) η διαχρονική μεταβολή του μέσω θηκογραμμάτων (boxplots). Τα θηκογράμματα υπολογίζονται ανά πενταετία, από τις τιμές του υετού των πλεγματικών σημείων που περικλείονται από την καμπύλη που αντιστοιχεί στην τιμή 0.75 των φορτίων (factor loadings) (Σχήμα 3.3) και αποτυπώνουν τη μεταβολή της διάμεσης τιμής, της διασποράς και των ακραίων τιμών κατά την περίοδο μελέτης.



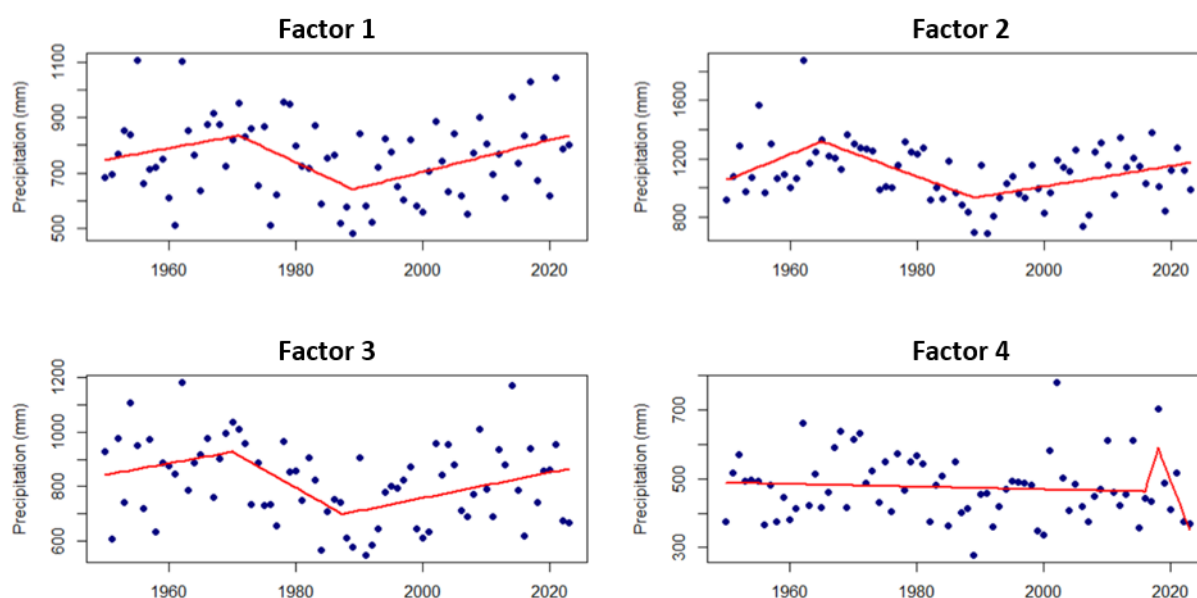
Σχήμα 3.5 Διαχρονική μεταβολή του ετήσιου ύψους νετού (σε mm) με χρήση θηκογραμμάτων (boxplots) για κάθε 5ετία της περιόδου 1950-2023 (κάθε υδρολογικό έτος αναφέρεται με το έτος έναρξης του).

Η μεγαλύτερης κλίμακας μεταβολές σε επίπεδο δεκαετιών (decadal) που διαφάνηκαν στο αντίστοιχο διάγραμμα 3.2 το οποίο αναφερόταν σε ολόκληρο τον ελλαδικό χώρο, διακρίνονται και στα διαγράμματα των περιοχών που ορίζονται από τους επιμέρους παράγοντες. Για ορισμένους παράγοντες, όπως ο F2 και F3, οι μεταβολές είναι περισσότερο έντονες και σαφείς και για άλλους (π.χ. ο F4) λιγότερο.

Παρατηρείται σημαντική μεταβολή του νετού μεταξύ των διαφορετικών χρονικών περιόδων (δεκαετιών), καθώς και παρουσία ακραίων τιμών, που υποδηλώνουν την εμφάνιση έντονων επεισοδίων νετού. Σε όλους τους παράγοντες διακρίνεται ένα κοινό πρότυπο μεταβολής, με τάση αύξησης του νετού τις πρώτες δεκαετίες της περιόδου μελέτης. Ακολουθεί μία γενικευμένη τάση μείωσης του νετού κυρίως κατά τη δεκαετία του 1980 και στη συνέχεια μία τάση ανάκαμψης (αύξησης) του προς τα τέλη της δεκαετίας του '90, σε επίπεδα συγκρίσιμα με εκείνα των προηγούμενων δεκαετιών. Το γεγονός ότι το πρότυπο αυτό εμφανίζεται σε όλους τους παράγοντες οι οποίοι εξηγούν συνολικά το 83.32% της διακύμανσης, υποδηλώνει ότι πρόκειται για μία ευρύτερη μεταβολή που χαρακτηρίζει το μεγαλύτερο μέρος του ελλαδικού χώρου και όχι για τοπικό φαινόμενο.

3.1.4 Προσδιορισμός χρονικών σημείων καμπής (breaking points)

Έχοντας διαπιστώσει πως κατά την 75-ετή περίοδο μελέτης ο υετός στον ελλαδικό χώρο, εκτός από την από έτος σε έτος μεταβολή, φαίνεται να παρουσιάζει μία μεγαλύτερης κλίμακας μεταβολή σε επίπεδο δεκαετιών με εναλλασσόμενες τάσεις αύξησης και μείωσης, προσδιορίστηκαν τα σημεία αναστροφής των τάσεων με στατιστικό τρόπο. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε η μέθοδος της τμηματικής παλινδρόμησης (segmented regression), με στόχο τον εντοπισμό σημείων καμπής (breakpoints ή change points) στις χρονοσειρές του ετήσιου ύψους του υετού για κάθε παράγοντα, των πλεγματικών σημείων που εμπεριέχονται στο εσωτερικό της ισοπληθής καμπύλης του 0.75 των factor loadings. Ο αριθμός των σημείων καμπής ορίστηκε ίσος με 2 σημεία βάσει της μέχρι τώρα ποιοτικής ανάλυσης των γραφημάτων της χρονικής μεταβολής του υετού και επαληθεύεται και από τα τεστ αξιολόγησης (AIC/BIC) σχετικών με τον ιδανικό αριθμό breakpoints (σημείων καμπής).



Σχήμα 3.6 Προσδιορισμός σημείων καμπής (breakpoints) με την εφαρμογή της της μεθόδου της τμηματικής παλινδρόμησης για τους τέσσερις παράγοντες σε όλη την περίοδο μελέτης 1950-2023.

Πίνακας 3.2 Χρονικά σημεία καμπής (breakpoints) για τους τέσσερις παράγοντες.

Factor	(Breaking Points) (Year)	
F1	1971 (± 6)	1989 (± 5)
F2	1965 (± 3)	1989 (± 4)
F3	1970 (± 5)	1987 (± 4)
F4	2015 (± 1.5)	2018 (± 2)

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της τμηματικής παλινδρόμησης φαίνονται στα διαγράμματα του Σχήματος 3.6 και συνοψίζονται στον Πίνακα 3.2. Γενικά, επιβεβαιώνεται

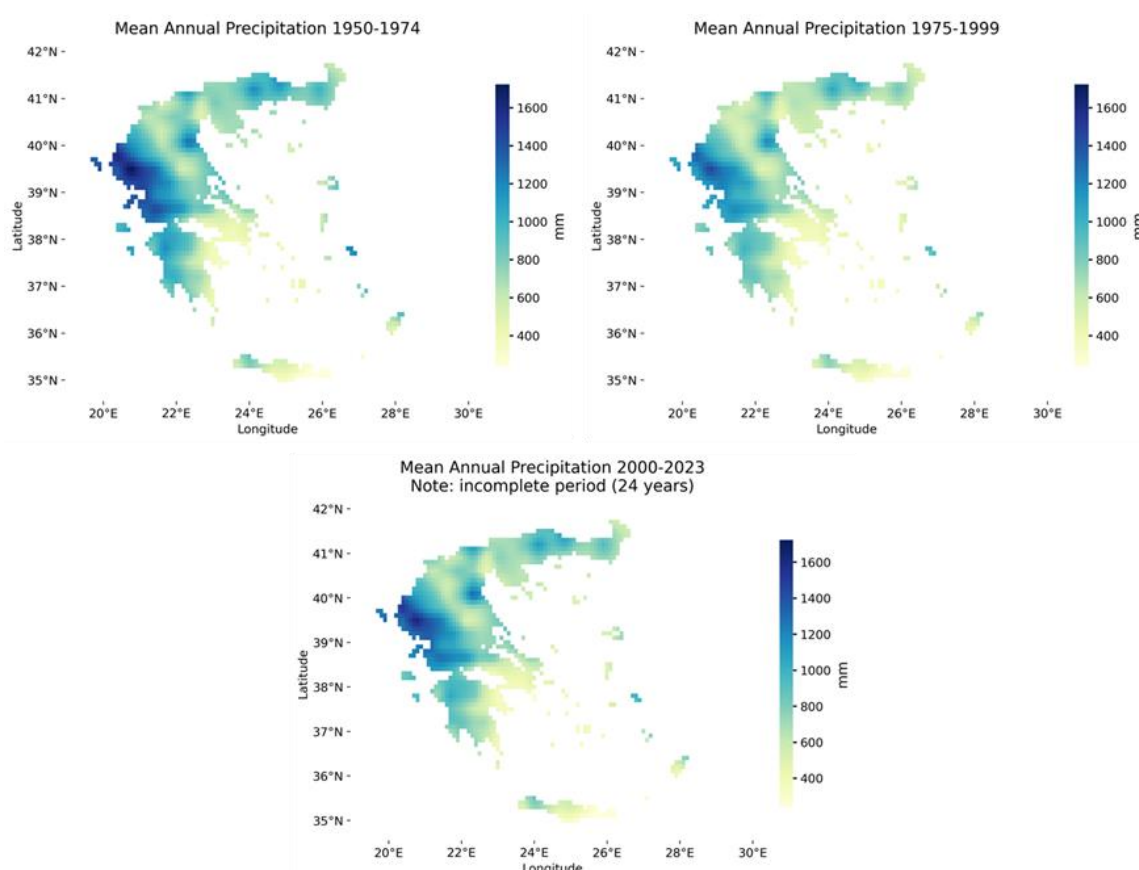
πως για τους παράγοντες F1, F2 και F3, το πρώτο σημείο καμπής εντοπίζεται γύρω από το έτος 1970 και το δεύτερο γύρω από το έτος 1990. Θα πρέπει να σημειωθεί πως για τον παράγοντα 2 ο οποίος αντιστοιχεί στη Δυτική Ελλάδα, την πιο υγρή περιοχή της χώρας, η αλλαγή της τάσης φαίνεται να ξεκινά λίγο νωρίτερα δηλαδή από τα μέσα της δεκαετίας του '60 (1965 ± 3 έτη). Αντίστοιχα, η αναστροφή της πτωτικής τάσης του υετού στον παράγοντα 3 λίγο πριν το 1990 και συγκεκριμένα το 1987. Το χρονικό διάστημα πριν το πρώτο σημείο καμπής χαρακτηρίζεται από μία σαφή τάση αύξησης του υετού και στους τρεις παράγοντες. Η περίοδος μεταξύ αυτών των σημείων καμπής, (1970 – 1990) χαρακτηρίζεται από τάση μείωσης του υετού, ενώ μετά το δεύτερο σημείο καμπής παρατηρείται αναστροφή της πτωτικής πορείας του με τάση αύξησης τις δεκαετίες που ακολουθούν. Αντίθετα, ο παράγοντας F4 παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά, χωρίς να εμφανίζονται σαφή και ευδιάκριτα σημεία καμπής. Θα πρέπει να σημειωθεί πως ο παράγοντας 4 περιλαμβάνει τις περιοχές της Ελλάδας με τα μικρότερα ποσά υετού.

Με εξαίρεση τον παράγοντα 4, η παρουσία του ίδιου χρονικού μοτίβου σε όλους σχεδόν τους παράγοντες ενισχύει την υπόθεση ότι πρόκειται για μεταβολές κλίμακας δεκαετίας που επηρεάζουν το σύνολο σχεδόν της χώρας. Τα αποτελέσματα αυτά είναι συνεπή με τις χρονοσειρές των τιμών επίδοσης των παραγόντων (factor scores) καθώς και τη διαχρονική μεταβολή του ετήσιου ύψους υετού όπως αποδόθηκε μέσω θηκογραμμάτων (boxplots) και επιβεβαιώνουν την μείωση του υετού κυρίως κατά τη δεκαετία του 1980, καθώς και επακόλουθη ανάκαμψη. Συνεπώς, οι μεταβολές αυτές ενδέχεται να σχετίζονται με μεταβολές στη γενικότερη κυκλοφορία της ατμόσφαιρας.

Με βάση τα παραπάνω ευρήματα, πραγματοποιείται στη συνέχεια η κλιματολογική ανάλυση του καθεστώτος του υετού στην Ελλάδα και σε επίπεδο 25-ετιών, 1950 – 1974, 1975 – 1999 και 2000 – 2023, με επισήμανση στην τελευταία 25ετία υπολείπεται ένα έτος. Οι συγκεκριμένες χρονικές περίοδοι αντιστοιχούν προσεγγιστικά στις περιόδους που ορίζονται από τα σημεία καμπής (breakpoints).

3.1.5 Ανάλυση ανά 25ετία

Στην προσέγγιση ανάλυσης του υετού στον Ελλαδικό χώρο σε 25-ετή βάση, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7 η χωρική κατανομή του μέσου ετήσιου ύψους του υετού στον χερσαίο Ελλαδικό χώρο για τις 25-ετίες 1950-1974, 1975-1999 και 2000-2023. Θα πρέπει να σημειωθεί πως η τελευταία περίοδος υπολείπεται ενός έτους καθώς στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιούνται υδρολογικά έτη.



Σχήμα 3.7 Χωρική κατανομή της μέσης κλιματολογικής τιμής του ετήσιου ύψους υετού στον χερσαίο Ελλαδικό χώρο για τις 25-ετής περιόδους, 1950-1974, 1975-1999, 2000-2023 (υπολείπεται ένα έτος στην τελευταία 25ετία καθώς χρησιμοποιούνται υδρολογικά έτη).

Πίνακας 3.3 Ελάχιστες και μέγιστες κλιματολογικές τιμές καθώς και η μέση τιμή υετού από τους ετήσιους μέσους όρους ανά 25ετία από το 1950 έως το 2023, (υπολείπεται ένα έτος στην τελευταία 25ετία καθώς χρησιμοποιούνται υδρολογικά έτη *).

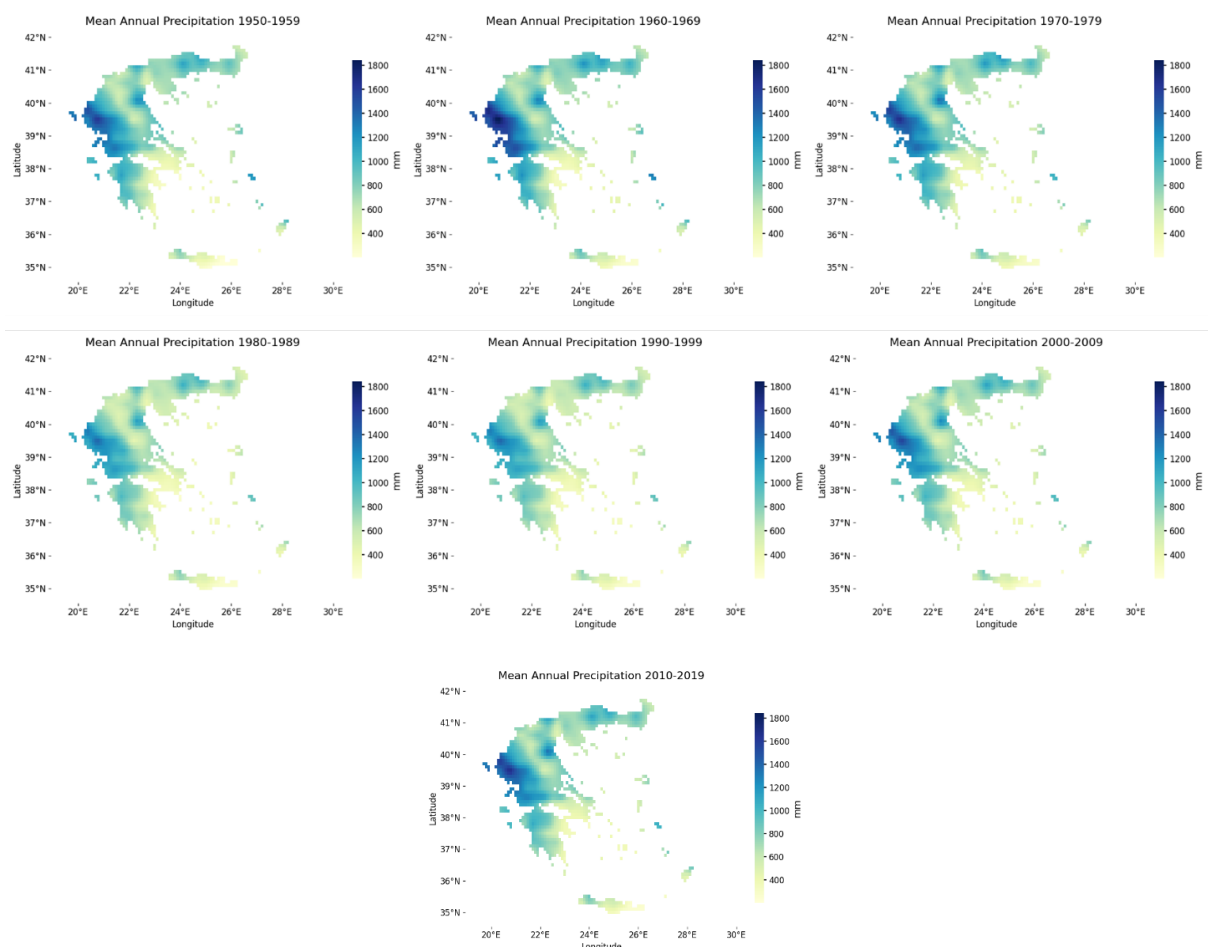
	Minimum (mm)	Maximum (mm)	Mean Value (mm)
1950-1974	240.46	1723.54	837.16
1975-1999	264.54	1428.42	726.46
2000-2023*	244.43	1614.38	785.33

Η πρώτη διαπίστωση που συνάγεται από τη χωρική κατανομή του μέσου ετήσιου υετού κατά τη διάρκεια της κάθε 25-ετίας, είναι πως είναι σχεδόν όμοιες μεταξύ τους και είναι πανομοιότυπες με τη μέση κλιματολογική κατανομή του ετήσιου υετού για όλη την περίοδο μελέτης. Όλα τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της μέσης κλιματολογικής χωρικής κατανομής που συζητήθηκαν παραπάνω, αποκαλύπτονται και εδώ. Σε κάθε 25-ετία, το μέγιστο του ετήσιου υετού καταγράφεται κατά μήκος του δεξιού άξονα της χώρας (στην ομβροπλευρά της οροσειράς της Πίνδου). Τα αυξημένα ποσά υετού στην Ανατολική Μακεδονία και Θράκη λόγω της επίδρασης της οροσειράς της Ροδόπης, καθώς και άλλα τοπικά μέγιστα που συνδέονται με το ανάγλυφο όπως στην Πιερία (Όλυμπος και Πιερία όρη) και τη Δυτική Κρήτη, επίσης αναδεικνύονται σε κάθε 25-ετία. Τα ελάχιστα ύψη υετού και στις τρεις περιόδους εντοπίζονται σε περιοχές της νότιας και κεντρικής Ελλάδας όπως: οι Κυκλάδες, μέρος των Δωδεκανήσων, Ανατολική Πελοπόννησος και Ανατολική Στερεά Ελλάδα. Περιορισμένα ποσά υετού καταγράφονται στην ομβροσκία της οροσειράς της Πίνδου σε όλες τις περιόδους, ενώ τοπικά ελάχιστα στη Κεντρική και Ανατολική Μακεδονία και Θράκη αντιστοιχούν στις ανοιχτές πεδιάδες της Βορείου Ελλάδας και συνδέονται με βόρεια καταβατική ροή που μεταφέρει ψυχρές και ξηρές αέριες μάζες από την περιοχή των Βαλκανίων και τα βορειοανατολικά (Lolis, 2012).

Ενώ η χωρική κατανομή του υετού είναι όμοια στις τρεις περιόδους, διαφορές εντοπίζονται στο ύψος του υετού με τη πρώτη 25ετία (1950-1974) να είναι πιο υγρή, τη δεύτερη 25ετία (1975 – 1999) φαίνεται μία σαφή μείωση στις κλιματολογικές τιμές του υετού (Σχήμα 3.7) κάτι που αποτυπώνεται επίσης και στον Πίνακα 3.3, όπου η μέγιστη τιμή είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με αυτή της πρώτης 25ετίας. Εν συνεχεία, την τρίτη και πιο πρόσφατη 25-ετία, παρατηρείται αύξηση του υετού σε σχέση με την προηγούμενη (1975 – 1999) χωρίς όμως ο υετός να φτάνει τα επίπεδα της πρώτης 25-ετίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παρατηρούμενες μεταβολές αφορούν κυρίως τις περιοχές με αυξημένα ετήσια ύψη υετού, όπου διαφαίνεται στις μέγιστες και μέσες τιμές του. Οι ελάχιστες τιμές του υετού από την άλλη δεν παρουσιάζουν ουσιαστική μεταβολή από τη μία 25-ετία στην άλλη και γενικά διατηρούνται στα ίδια επίπεδα. Εκείνο που φαίνεται να αυξάνει κατά την 2^η και πιο ξηρή περίοδο, είναι η έκταση των περιοχών που χαρακτηρίζονται από χαμηλά ποσά υετού.

3.1.6 Ανάλυση ανά 10ετία

Με βάση την ανάλυση που προηγήθηκε και η οποία ανέδειξε κατά την περίοδο μελέτης (1950 – 2019), μεταβολές του ύψους του υετού σε κλίμακα 25-ετίας, στη συγκεκριμένη ενότητα αναλύεται η χωρική κατανομή του μέσου ετήσιου ύψους του υετού σε πιο λεπτομερή χρονική κλίμακα, σε επίπεδο δεκαετίας (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8 Χωρική κατανομή της μέσης κλιματολογικής τιμής του ετήσιου ύψους νετού στον χερσαίο Ελλαδικό χώρο για τις 10-ετής περιόδους, 1950-1959, 1960-1969, 1970-1979, 1980-1989, 1990-1999, 2000-2009, 2010-2019.

Πίνακας 3.4 Ελάχιστες και μέγιστες κλιματολογικές τιμές καθώς και η μέση τιμή νετού από τους ετήσιους μέσους όρους ανά 10ετία από το 1950 έως το 2019.

	Minimum (mm)	Maximum (mm)	Mean Value (mm)
1950-1959	203.29	1603.54	803.66
1960-1969	256.97	1842.36	854.71
1970-1979	276.86	1666.77	834.90
1980-1989	258.99	1381.26	707.41
1990-1999	257.89	1385.96	708.38
2000-2009	244.05	1535.74	761.82
2010-2019	251.97	1666.91	811.02

Στην ανάλυση των δεκαετιών επαληθεύεται η εικόνα των 25ετιών. Και σε επίπεδο δεκαετίας η χωρική κατανομή του ετήσιου ύψους του νετού ακολουθεί το μέσο κλιματολογικό πρότυπο με τη χαρακτηριστική βαθμίδα μείωσης από τα δυτικά προς τα ανατολικά της ηπειρωτικής χώρας. Σε όλες τις δεκαετίες, τα μέγιστα ποσά νετού καταγράφονται στα δυτικά της Ελλάδας και συγκεκριμένα στα βορειοδυτικά (ομβροπλευρά της οροσειράς της Πίνδου)

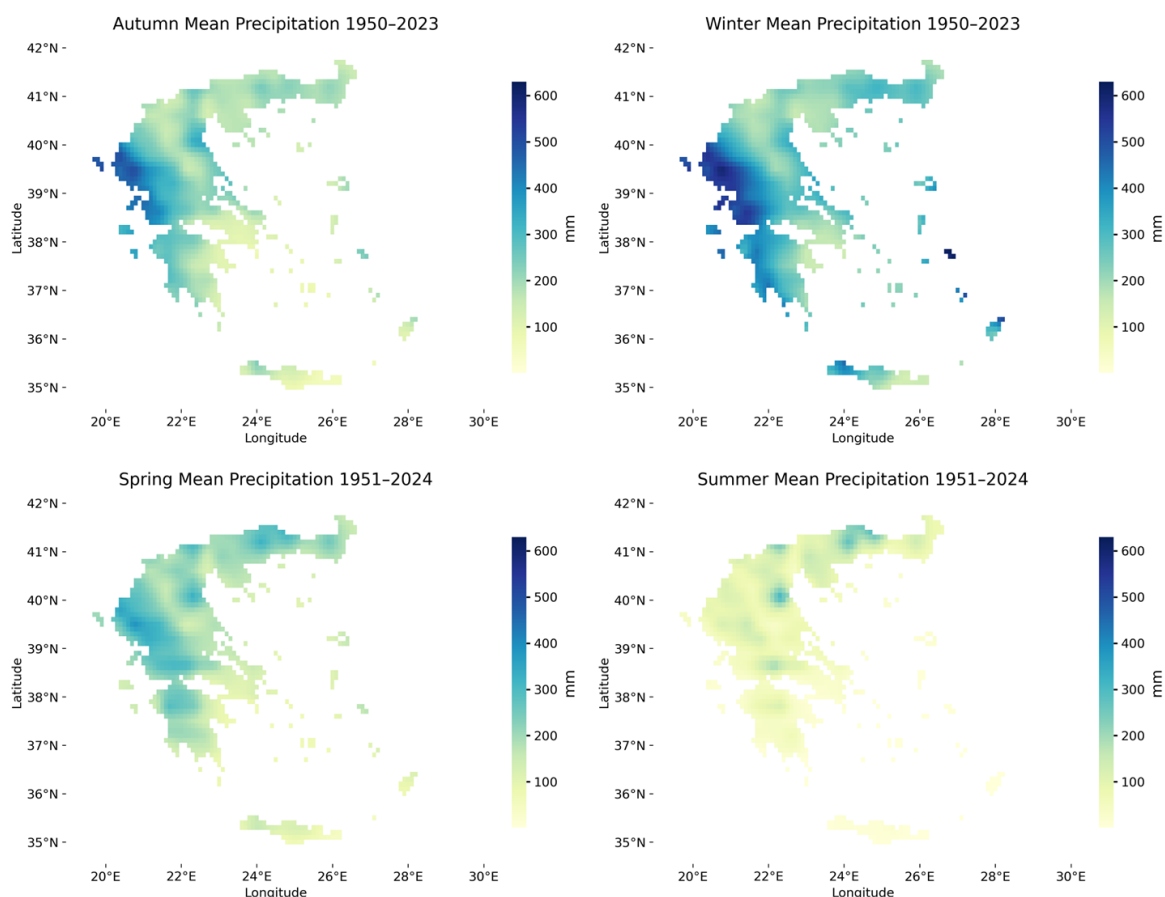
και τα ελάχιστα στην ανατολική ηπειρωτική χώρα (ομβροσκιά της οροσειράς της Πίνδου) και τα νησιά του κεντρικού και νότιου Αιγαίου. Επιμέρους μέγιστα και ελάχιστα που αποδίδονται κατά κύριο λόγο στην επίδραση του ανάγλυφου εμφανίζονται επίσης.

Επίσης, η ανάλυση σε βάση δεκαετίας, επιβεβαιώνει αλλά και προσδιορίζει με καλύτερη σαφήνεια περιόδους με αυξημένα ή μειωμένα ποσά υετού. Σύμφωνα με το Σχήμα 3.8 και τον Πίνακα 3.4, η πιο υγρή δεκαετία της περιόδου μελέτης είναι εκείνη του 1960 (854.71 mm) και ακολουθεί η δεκαετία του '70 (834.90 mm), εξηγώντας γιατί η πρώτη 25-ετία της περιόδου μελέτης χαρακτηρίζεται από τα υψηλότερα ποσά υετού. Από την άλλη πλευρά, οι πιο ξηρές δεκαετίες για όλη τη χρονική περίοδο μελέτης είναι του 1980 και 1990 όπου καταγράφονται οι χαμηλότερες μέσες κλιματολογικές τιμές (707.41 mm και 708.38 mm αντίστοιχα). Τέλος, επικυρώνεται η τάση ανάκαμψης του υετού τη δεκαετία του 2000 (761.82 mm), η οποία εδραιώνεται και την επόμενη δεκαετία του 2010 με συγκρίσιμο μέσο ετήσιο ποσό υετού (811.02 mm).

Όπως στην περίπτωση της ανάλυσης σε κλίμακα 25-ετίας, τα ελάχιστα ύψη υετού δεν φαίνεται να παρουσιάζουν κάποια σημαντική μεταβολή από δεκαετία σε δεκαετία καθώς παραμένουν συστηματικά κάτω των 300 mm. Ωστόσο, τις δύο ξηρές δεκαετίες ('80 και '90) είναι περισσότερες και πιο εκτεταμένες οι περιοχές με χαμηλά ποσά υετού.

3.1.7 Εποχική ανάλυση

Δεδομένου ότι το Μεσογειακό κλίμα χαρακτηρίζεται από διακριτή υγρή και ξηρή περίοδο, με την υγρή να ταυτίζεται με την ψυχρή εποχή του έτους, η ανάλυση του υετού σε εποχική βάση έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Στην παρούσα εργασία, η εποχική ανάλυση πραγματοποιείται με όρους χωρικής κατανομής του εποχικού αθροιστικού ύψους υετού, μεσοποιημένο σε όλη την περίοδο μελέτης (1950 – 2024). Δεν δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις τιμές του ποσού του υετού ανά εποχή καθώς επρόκειτο για δεδομένα επανανάλυσης. Η χωρική κατανομή του αθροιστικού ύψους υετού ανά εποχή παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9, ενώ ο Πίνακας 3.5 δίνει τη μέση κλιματολογική τιμή του υετού για κάθε εποχή του έτους, καθώς και το απόλυτο μέγιστο και ελάχιστο ποσό υετού που έχει καταγραφεί σε κάθε εποχή κατά την περίοδο 1950 – 2024.



Σχήμα 3.9 Χωρική κατανομή του αθροιστικού νετού ανά εποχή. Οι τιμές είναι μέσοι όροι κατά την περίοδο από το 1950 έως το 2024.

Πίνακας 3.5 Μέσες κλιματολογικές τιμές και ελάχιστες και μέγιστες τιμές του νετού όλων των διαθέσιμων πλεγματικών σημείων ανά εποχή από το 1950 έως το 2024.

	Minimum (mm)	Maximum (mm)	Mean Value (mm)
Autumn	57.54	507.81	216.63
Winter	130.08	629.83	292.48
Spring	43.88	380.94	195.37
Summer	1.00	300.34	78.47

Η εποχική κατανομή του νετού στην Ελλάδα παρουσιάζει αναμενόμενα αποτελέσματα, τόσο ως προς την ένταση όσο και ως προς την χωρική κατανομή. Κατά τη χειμερινή περίοδο καταγράφονται τα μεγαλύτερα ύψη νετού, ιδιαίτερα στη δυτική Ελλάδα. Αντίστοιχα, το φθινόπωρο εμφανίζει επίσης αυξημένες τιμές νετού με παρόμοια χωρική κατανομή με χαμηλότερες όμως τιμές νετού σε σχέση με τον χειμώνα. Κατά την άνοιξη, παρατηρείται μείωση των τιμών νετού σε σχέση με τον χειμώνα και το φθινόπωρο, ενώ διατηρείται το δυτικό-ανατολικό πρότυπο κατανομής. Το καλοκαίρι χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα χαμηλά ύψη στο σύνολο σχεδόν της χώρας, με τον νετό να περιορίζεται κυρίως σε τοπικά φαινόμενα, ιδιαίτερα σε ορεινές περιοχές.

Η επικράτηση θερμών και ξηρών συνθηκών στη Μεσόγειο κατά τη θερινή περίοδο, με τα συνολικά ύψη υετού να παραμένουν συνήθως κάτω από τα 100 mm, οφείλεται σε μια σειρά ατμοσφαιρικών διεργασιών που χαρακτηρίζουν τη θερμή εποχή. Αρχικά, η μετατόπιση του πολικού αεροχειμάρρου βορειότερα έχει ως αποτέλεσμα τη μετακίνηση των τροχιών των υφέσεων προς υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη, περιορίζοντας σημαντικά τη διέλευση βαρομετρικών συστημάτων από τη Μεσόγειο. Παράλληλα, η βορειότερη θέση κατά τη θερμή περίοδο και του υποτροπικού αεροχειμάρρου, διευκολύνει τη μεταφορά θερμών και ξηρών αερίων μαζών από τη Βόρεια Αφρική προς τη Μεσόγειο, ενισχύοντας περαιτέρω τις ξηρές και θερμές συνθήκες που επικρατούν κατά τη θερινή περίοδο. Επίσης, η κρύα (σε σχέση με τον αέρα) επιφάνεια της θάλασσας ενισχύει πολύ την ευστάθεια πάνω από αυτή. Επιπλέον, η επέκταση του υποτροπικού αντικυκλώνα των Αζορών πάνω από την περιοχή ευνοεί την επικράτηση αντικυκλωνικών συνθηκών, οι οποίες συνδέονται με καθοδικές κινήσεις των αερίων μαζών, αδιαβατική θέρμανση και χαμηλά επίπεδα υγρασίας.

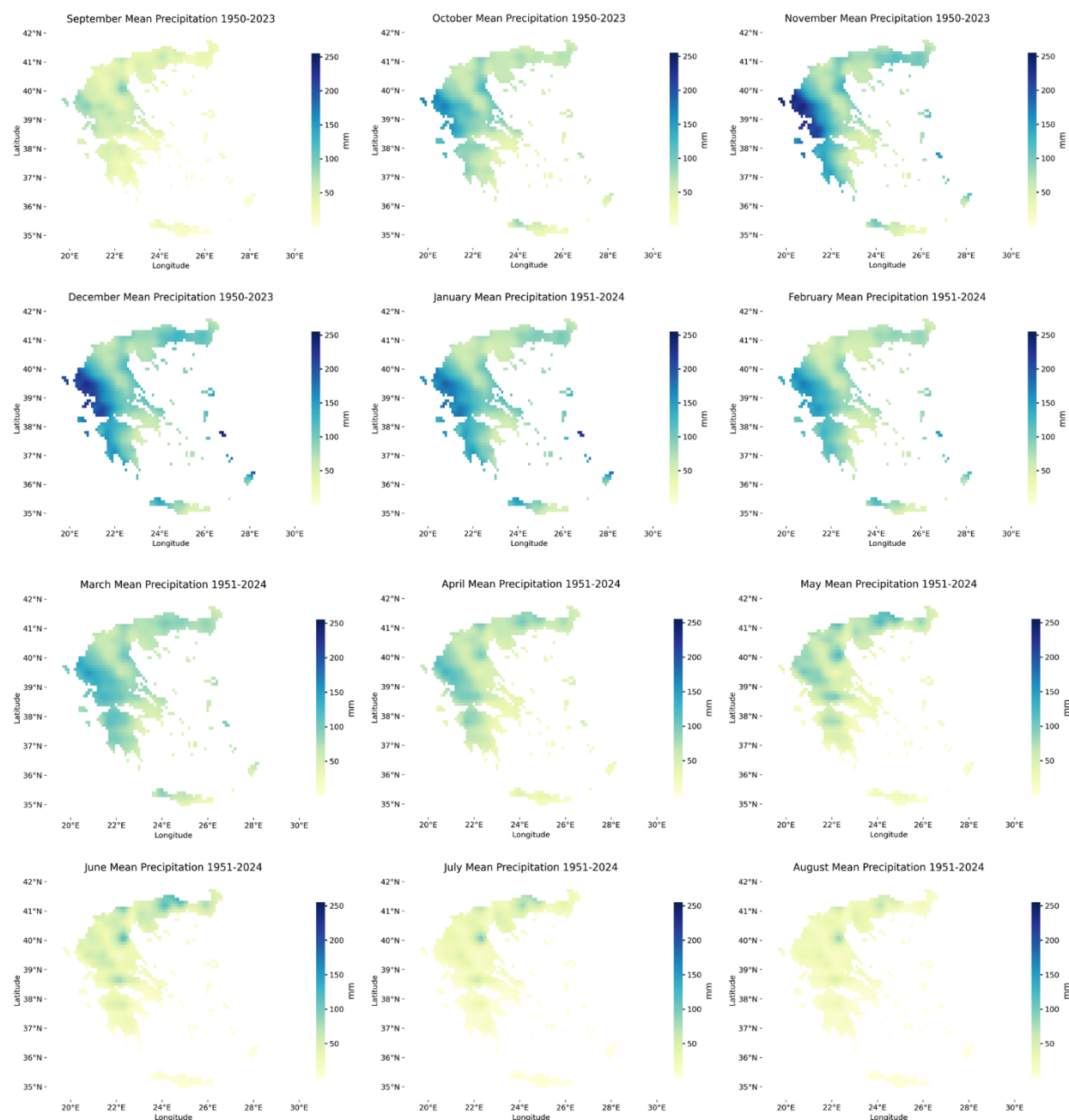
Η από δυσμίας προς ανατολάς βαθμίδα μείωσης του υετού δεν παρατηρείται το θέρος αλλά μάλλον διακρίνεται μία βαθμιαία μείωση από βορρά προς νότο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο υετός αυτή την εποχή του έτους δεν συνδέεται με τη διέλευση υφέσεων αλλά είναι αποτέλεσμα κυρίως θερμικών καταγίδων λόγω στατικής αστάθειας που προκαλείται από την ισχυρή θέρμανση της ξηράς. Τοπικά μέγιστα (μέχρι 200 mm) εμφανίζονται στις ηπειρωτικές περιοχές της χώρα και κυρίως σε ορεινούς όγκους όπου η ορογραφική ανύψωση ενισχύει τις ανοδικές κινήσεις (convection) και επομένως και την εκδήλωση καταγίδων (Hatzianastassiou et al., 2008; Lolis, 2012).

Κατά την υγρή περίοδο του έτους, ο υετός είναι κυρίως υφεσιακής προέλευσης. Ο υποτροπικός αντικυκλώνας εξασθενεί και περιορίζεται στον Ατλαντικό ωκεανό, ενώ ο πολικός αεροχειμάρρος μετακινείται σε νοτιότερα γεωγραφικά πλάτη με αποτέλεσμα υφέσεις που σχηματίζονται κατά μήκος του πολικού μετώπου να εισέρχονται στη Μεσόγειο και να τη διασχίζουν κινούμενες προς τα ανατολικά. Παράλληλα, η βαροκλινική αστάθεια που επικρατεί πάνω από τη θερμή θάλασσα δημιουργεί κέντρα κυκλογένεσης στην ίδια τη Μεσόγειο, όπως στον κόλπο της Γένοβας και τον κόλπο των Λεόντων. Οι υφέσεις αυτές κινούμενες σε τροχιές με γενική κατεύθυνση από τα δυτικά προς τα ανατολικά προκαλούν τα μεγάλα ύψη υετού κατά την υγρή περίοδο.

Η ανάλυση της εποχικής κατανομής του υετού στην Ελλάδα, υπέδειξε στοιχεία της κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας που τη διαμορφώνουν. Πέρα από αυτή τη θεμελιώδη πληροφορία, αποτελεί τη βάση της εφαρμοσμένης κλιματολογίας και υδρολογίας για τη χώρα. Σε αυτό το πλαίσιο, η εποχική ανάλυση επεκτάθηκε σε μηνιαία βάση ώστε να αναδειχτούν μεταβολές στην ενδοετήσια κατανομή του υετού που καθορίζουν το υδρολογικό προφίλ της Ελλάδας.

3.1.8 Μηνιαία ανάλυση

Η μηνιαία ανάλυση, όπως και στην περίπτωση της εποχικής, έχει σαν βάση της τη χωρική κατανομή του μέσου μηνιαίου ύψους νετού για την περίοδο 1950 – 2024 (Σχήμα 3.10). Ο Πίνακας 3.6 δίνει τη μέση κλιματολογική τιμή του νετού για κάθε μήνα του έτους, καθώς και το απόλυτο μέγιστο και ελάχιστο ποσό νετού που έχει καταγραφεί σε κάθε μήνα κατά την περίοδο μελέτης 1950 – 2024.



Σχήμα 3.10 Χωρική κατανομή του μηνιαίου νετού. Οι τιμές είναι μέσοι όροι της περιόδου από το 1950 έως το 2024.

Πίνακας 3.6 Ελάχιστες και μέγιστες κλιματολογικές τιμές υετού από τους μηνιαίους μέσους όρους καθώς και μέσες τιμές για την περίοδο 1950 - 2024.

	Minimum (mm)	Maximum (mm)	Mean Value (mm)
September	3.52	97.75	41.34
October	22.89	170.40	76.82
November	27.80	255.22	98.48
December	42.68	243.45	109.44
January	45.23	232.96	97.96
February	39.16	172.84	85.08
March	28.56	151.53	81.25
April	10.51	128.96	60.99
May	4.80	126.23	53.13
June	1.00	129.41	35.72
July	1.00	98.08	22.51
August	1.00	86.88	20.24

Η μηνιαία κατανομή του υετού στην Ελλάδα παρουσιάζει έντονη εποχικότητα, με σαφή διαφοροποίηση μεταξύ των υγρών και ξηρών περιόδων του έτους. Οι υψηλότερες τιμές υετού καταγράφονται κατά τους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες, με τον Δεκέμβριο να εμφανίζεται ως ο πιο υγρός μήνας (109.44 mm). Αντίστοιχα υψηλές τιμές καταγράφονται και τον Νοέμβριο και τον Ιανουάριο, γεγονός που επιβεβαιώνει τη συγκέντρωση του μεγαλύτερου μέρους του ετήσιου υετού στη ψυχρή περίοδο. Κατά τους θερινούς μήνες (Ιούνιος–Αύγουστος) οι τιμές του υετού είναι ιδιαίτερα χαμηλές (20.24 mm – 35.72 mm), υποδηλώνοντας την επικράτηση ξηρών συνθηκών στο σύνολο σχεδόν της χώρας. Οι μεταβατικές περίοδοι της άνοιξης και του φθινοπώρου παρουσιάζουν ενδιάμεσες τιμές, με το φθινόπωρο να εμφανίζει συγκριτικά μεγαλύτερες τιμές υετού σε σχέση με την άνοιξη.

Η διαφοροποιημένη, σε σχέση με τη μέση κλιματολογική, χωρική κατανομή του υετού κατά τη θερινή περίοδο όπως αποκαλύφθηκε από την εποχική ανάλυση, εντοπίζεται τους θερινούς μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο. Σε αυτούς τους μήνες, ο υετός εμφανίζει τις ελάχιστες τιμές του στο σύνολο σχεδόν της χώρας ενώ κάποια ποσά (50 – 100 mm) σημειώνονται στις βόρειες, ορεινές περιοχές της ηπειρωτικής χώρας δημιουργώντας έτσι μία βαθμίδα μείωσης του υετού από βόρεια προς τα νότια. Η βαθμίδα αυτή φαίνεται να είναι πιο έντονη με μεγαλύτερα ποσά υετού, τον μήνα Ιούνιο. Τους θερινούς μήνες ο υετός συνδέεται κυρίως με θερμικές καταιγίδες, οι οποίες είναι αποτέλεσμα έντονης στατικής αστάθειας που δημιουργείται λόγω ισχυρής θέρμανσης του εδάφους και ψυχρών αερίων μαζών στη μέση τροπόσφαιρα, ενώ διέλευση διαταραχών στην ανώτερη ατμόσφαιρα επίσης συμβάλει στην εκδήλωση καταιγίδων (Lolis, 2012). Παρότι στο Μεσογειακό κλίμα οι μήνες Μάιος και Σεπτέμβριος εντάσσονται στη θερμή περίοδο του έτους, η χωρική κατανομή του υετού αυτούς τους δύο μήνες δεν ακολουθεί το θερινό πρότυπο. Το Σεπτέμβριο, που παρότι γενικά εμφανίζεται ξηρός μήνας (41.34 mm) αρχίζει ήδη να διαφαίνεται η από δυτικά προς ανατολικά βαθμίδα του υετού καθώς εμφανίζονται αυξημένα, σε σχέση με την υπόλοιπη χώρα, ποσά στα βορειοδυτικά της χώρας. Η βαθμίδα αυτή ενισχύεται τον μήνα Οκτώβριο και μπορεί να

αποδοθεί στην επίδραση των πρώτων υφέσεων της υγρής περιόδου οι οποίες κινούνται βορειοανατολικά προς τη Μαύρη Θάλασσα και επηρεάζουν κυρίως τη βορειοδυτική Ελλάδα (Bartzokas et al., 2003; Lolis, 2012). Η μέση κλιματολογική εικόνα με την από δυτικά προς τα ανατολικά βαθμίδα μείωσης του υετού, αποκαθίσταται πλήρως τον Νοέμβριο, όπου μέγιστα ποσά υετού παρατηρούνται σε όλη τη Δυτική Ελλάδα συμπεριλαμβανομένης της δυτικής Κρήτης, ενώ ελάχιστα ύψη καταγράφονται στην ανατολική πλευρά της ηπειρωτικής χώρας και τα νησιά του κεντρικού και νοτίου Αιγαίου. Αυξημένα ύψη υετού σημειώνονται στα νησιά του Ανατολικού Αιγαίου, στη Ανατολική Μακεδονία και Θράκη. Η διαμορφωμένη πλέον χωρική κατανομή διατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια της υγρής περιόδου, με την παρατηρούμενη βαθμίδα να εμφανίζει τη μεγαλύτερη ένταση της τους μήνες Νοέμβριο και Δεκέμβριο και στη συνέχεια να μειώνεται σταδιακά μέχρι τον Απρίλιο. Θα πρέπει να σημειωθεί πως ο υετός στα νησιά του Ανατολικού Αιγαίου εμφανίζεται αυξημένος τους μήνες Νοέμβριο και Δεκέμβριο και μειώνεται βαθμιαία στις ελάχιστες τιμές του την Άνοιξη. Αντίστοιχα, την Άνοιξη παρατηρείται μείωση του υετού και στη Θράκη. Ο Μάιος φαίνεται να εμφανίζει ιδιαίτερη γεωγραφική κατανομή καθώς περιέχει στοιχεία τόσο από τη χωρική κατανομή της υγρής περιόδου όσο και από τη θερμότητα. Συγκεκριμένα, από τη χωρική κατανομή της υγρής περιόδου διακρίνεται η βαθμίδα μείωσης του υετού από τα δυτικά προς τα ανατολικά αλλά περιορίζεται μόνο στην ηπειρωτική χώρα (ομβροπλευρά – ομβροσκιά της οροσειράς της Πίνδου), καθώς το ύψος του υετού στα νησιά του Ιονίου είναι ελάχιστο. Αντίστοιχα από τη χωρική κατανομή της ξηρής περιόδου, διακρίνονται τα μέγιστα στους ορεινούς όγκους και ιδιαίτερα στη βόρεια Ελλάδα με αποτέλεσμα να αποτυπώνεται κυρίως στα ανατολικά της χώρας, η θερινή βαθμίδα, βορρά – νότου, μείωσης του υετού.

Οι δύο τύποι χωρικής κατανομής του υετού που αναδείχτηκαν είναι διακριτοί καθώς ο ένας κυριαρχεί κατά την υγρή περίοδο του έτους και ο άλλος την ξηρή. Η διαφοροποίηση αυτή και επομένως οι δύο διακριτοί τύποι κατανομής, συνδέονται κυρίως με τη διαφορετική προέλευση του υετού στις δύο περιόδους: υφιστάμενη κατά την υγρή περίοδο και θερμική κατά την ξηρή. Διαφοροποιήσεις όμως που εμφανίζονται μεταξύ των μηνών της υγρής περιόδου, αφορούν κυρίως το μέγιστο του υετού στις διάφορες περιοχές. Παράδειγμα, η αύξηση του υετού σημειώνεται πρώτα στη βορειοδυτική Ελλάδα και ένα με δύο μήνες αργότερα εμφανίζεται το μέγιστο στα νότια της Δυτικής Ελλάδας (Πελοπόννησο). Αντίστοιχα, το μέγιστο του υετού στη δυτική Κρήτη και το νοτιοανατολικό Αιγαίο σημειώνεται 1 – 2 μήνες αργότερα σε σχέση με τα βορειοδυτικά. Αυτού του τύπου οι διαφοροποιήσεις σχετίζονται κατά κύριο λόγο με τις επικρατούσες τροχιές των υφέσεων (Lolis, 2012). Σύμφωνα με τους Bartzokas et al., (2003), η υστέρηση 1-2 μήνες στην εμφάνιση μεγίστου στις νότιες περιοχές σε σχέση με τα βορειοδυτικά συνάδει με την προς νότο μετατόπιση των τροχιών των υφέσεων από το Φθινόπωρο στον Χειμώνα.

Συμπερασματικά, η ανάλυση της χωρικής και χρονικής κατανομής του υετού στην Ελλάδα για την περίοδο 1950–2024 ανέδειξε τα βασικά κλιματικά χαρακτηριστικών που διαμορφώνουν το καθεστώς υετού της χώρας. Σε ετήσια βάση, η χωρική κατανομή του υετού χαρακτηρίζεται από την έντονη βαθμίδα μείωσης από τα δυτικά προς τα ανατολικά, με υψηλότερες τιμές στη δυτική Ελλάδα και ιδιαίτερα στο βορειοδυτικό τμήμα, κάτι που αναφέρεται και από τους Fotiadi et al. (1999) και χαμηλότερες στην ανατολική και νησιωτική χώρα, η οποία συνδέεται κυρίως με τη γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας και την

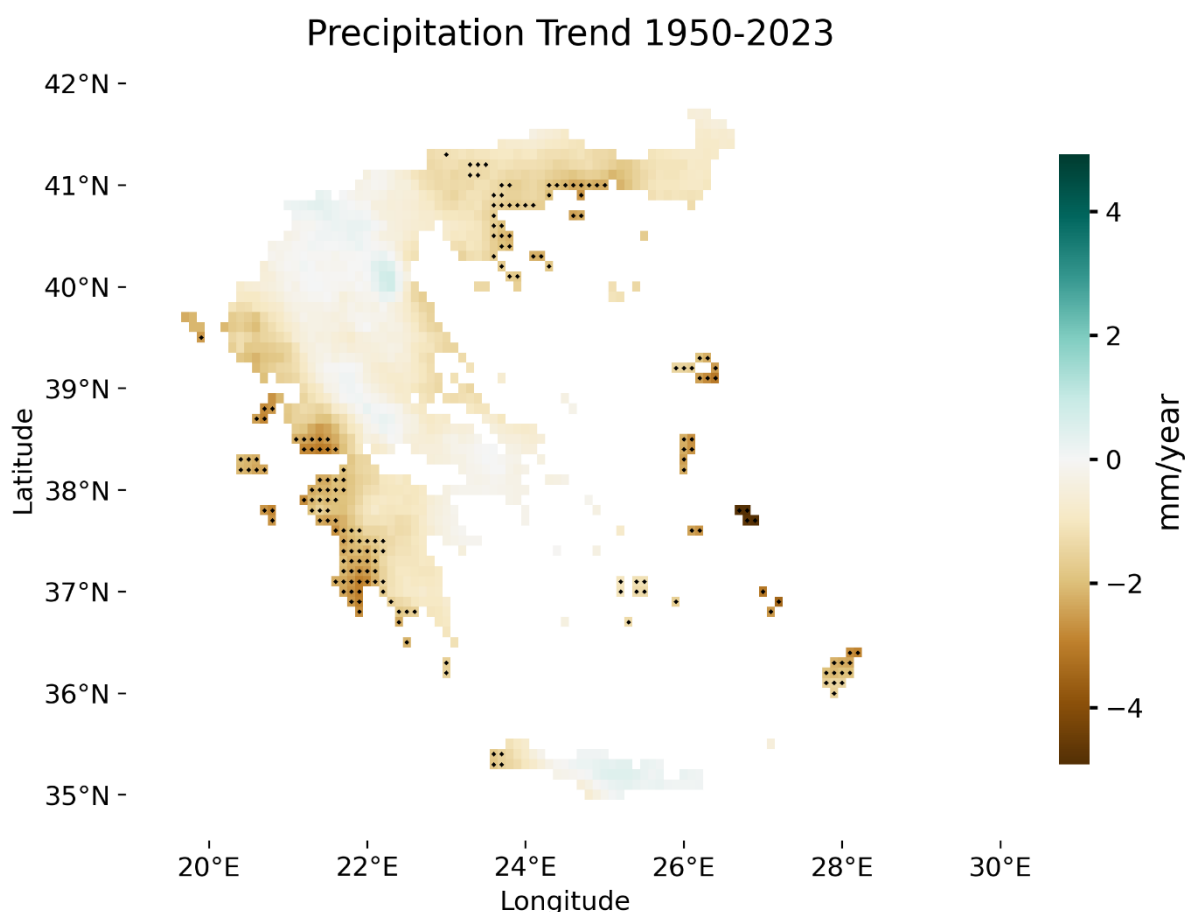
καθοριστική επίδραση της ορεογραφίας. Η οροσειρά της Πίνδου, καθώς και άλλοι σημαντικοί ορεινοί όγκοι της χώρας, ενισχύουν τα φαινόμενα εξαναγκασμένης ανύψωσης των αερίων μαζών, δημιουργώντας περιοχές αυξημένου υετού στις προσήνεμες πλευρές και περιοχές μειωμένου υετού στις υπήνεμες. Η ανάλυση σε 25ετή και δεκαετή κλίμακα ανέδειξε σημαντικές διακυμάνσεις στο ύψος του υετού. Η περίοδος 1950–1974 και ιδιαίτερα οι δεκαετίες του 1960 και του 1970 εμφανίζονται ως οι πλέον υγρές της περιόδου μελέτης, ενώ οι δεκαετίες του 1980 και του 1990 χαρακτηρίζονται από αισθητά μειωμένα ποσά υετού. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1990, παρατηρείται εκ νέου αύξηση των τιμών του υετού, χωρίς όμως να επανέρχονται πλήρως στα επίπεδα των πρώτων δεκαετιών της ανάλυσης. Οι μεταβολές αυτές αφορούν κυρίως τις περιοχές με υψηλά ποσά υετού, ενώ οι ξηρές περιοχές της χώρας παρουσιάζουν μικρότερη μεταβλητότητα. Η εποχική και μηνιαία ανάλυση επιβεβαιώνει το έντονα μεσογειακό κλίμα της Ελλάδας. Το μεγαλύτερο μέρος του ετήσιου υετού συγκεντρώνεται κατά τη ψυχρή περίοδο του έτους, με τον χειμώνα και το φθινόπωρο να εμφανίζουν τα υψηλότερα ποσά υετού και τον Δεκέμβριο να αποτελεί τον υγρότερο μήνα. Αντίθετα, κατά τη θερινή περίοδο ο υετός περιορίζεται σημαντικά. Κατά την υγρή περίοδο κυριαρχεί ο υετός υφεσιακής προέλευσης, ο οποίος διαμορφώνει την χαρακτηριστική δυτικοανατολική βαθμίδα κατανομής. Κατά τη θερμή περίοδο, η επικράτηση αντικυκλωνικών συνθηκών και η περιορισμένη διέλευση υφέσεων οδηγούν σε πολύ χαμηλά ύψη υετού, με τα φαινόμενα να συνδέονται κυρίως με θερμικές καταιγίδες. Συνολικά, τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τον καθοριστικό ρόλο της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, της τοπογραφίας και των μηχανισμών γένεσης του υετού στη διαμόρφωση του υδρολογικού καθεστώτος της Ελλάδας.

3.2 Τάσεις Υετού

Σε αυτή την ενότητα του κεφαλαίου εξετάζεται η χρονική εξέλιξη του υετού στον ελλαδικό χώρο, με στόχο τον εντοπισμό και την ανάλυση πιθανών τάσεων κατά την περίοδο μελέτης. Η διερεύνηση των τάσεων του υετού είναι απαραίτητη για την αποτύπωση του υδρολογικού καθεστώτος της υπό μελέτη περιοχής. Για την ανάλυση των τάσεων, εφαρμόστηκε ο μη παραμετρικός έλεγχος Mann–Kendall ώστε να καθοριστούν οι τάσεις. Η στατιστική σημαντικότητα των τάσεων αξιολογήθηκε μέσω του p-value, με τιμές $p < 0.05$ να υποδηλώνουν στατιστικά σημαντική τάση σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, και αποτυπώνονται στους χάρτες με κουκκίδες (●) στα πλεγματικά σημεία όπου βρέθηκαν να είναι στατιστικά σημαντικές. Για τον υπολογισμό της κλίσης της τάσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος εκτίμησης Theil–Sen. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες: για όλη τη χρονική περίοδο, 25-ετίες, 10-ετίες βάσει του ετήσιου ύψους υετού, αλλά και σε εποχική και μηνιαία βάση, καθώς και σε επίπεδο υγρής και ξηρής περιόδου, προκειμένου να διερευνηθεί τόσο η χρονική εξέλιξη των μεταβολών του υετού όσο και η χωρική κατανομή τους.

3.2.1 Ανάλυση για τη χρονική περίοδο 1950-2023

Η χωρική κατανομή των γραμμικών τάσεων του ετήσιου ύψους υετού όπως υπολογίστηκαν για τη όλη την περίοδο μελέτης (υδρολογικά έτη της περιόδου 1950 -2024) και για κάθε πλεγματικό σημείο, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11 Χωρική κατανομή των τάσεων του νετού (σε mm/yr) από το 1950 έως το 2023. Οι κουκίδες (●) αντιπροσωπεύουν στατιστικά σημαντικές τάσεις με $p < 0.05$.

Πίνακας 3.7 Μέγιστες αρνητικές και θετικές τιμές τάσεων νετού από το 1950 έως το 2023.

	Maximum Negative Trend (mm/year)	Maximum Positive Trend (mm/year)
1950-2023	- 4.92 - 364.08 total	0.79 58.46 total

Η χωρική κατανομή των τάσεων του νετού για όλη τη χρονική περίοδο μελέτης 1950–2023, χαρακτηρίζεται κυρίως από αρνητικές τιμές στο μεγαλύτερο μέρος του Ελλαδικού χώρου, υποδηλώνοντας γενικευμένη μείωση του νετού. Στο μεγαλύτερο μέρος της επικράτειας υπολογίστηκαν αρνητικές τάσεις μικρότερες όμως των -2 mm/yr. Ωστόσο, η μέγιστη μείωση του ετήσιου νετού που υπολογίστηκε αγγίζει τα 5 mm/yr (Πίνακας 3.7). Οι αρνητικές τάσεις είναι εντονότερες και πιο ισχυρές με τιμές μεταξύ -2 και -4 mm/yr, στη δυτική και νοτιοδυτική Ελλάδα (νησιά του ιονίου, νοτιοδυτική Αιτωλοακαρνανία και δυτική Πελοπόννησο), στη δυτική Κρήτη, στο ανατολικό και νότιο Αιγαίο καθώς και σε περιοχές της ανατολικής Μακεδονίας. Σε αυτές τις περιοχές με τις πιο έντονες τάσεις μείωσης του νετού, εντοπίζονται και τα περισσότερα πλεγματικά σημεία με στατιστικά σημαντικές μεταβολές.

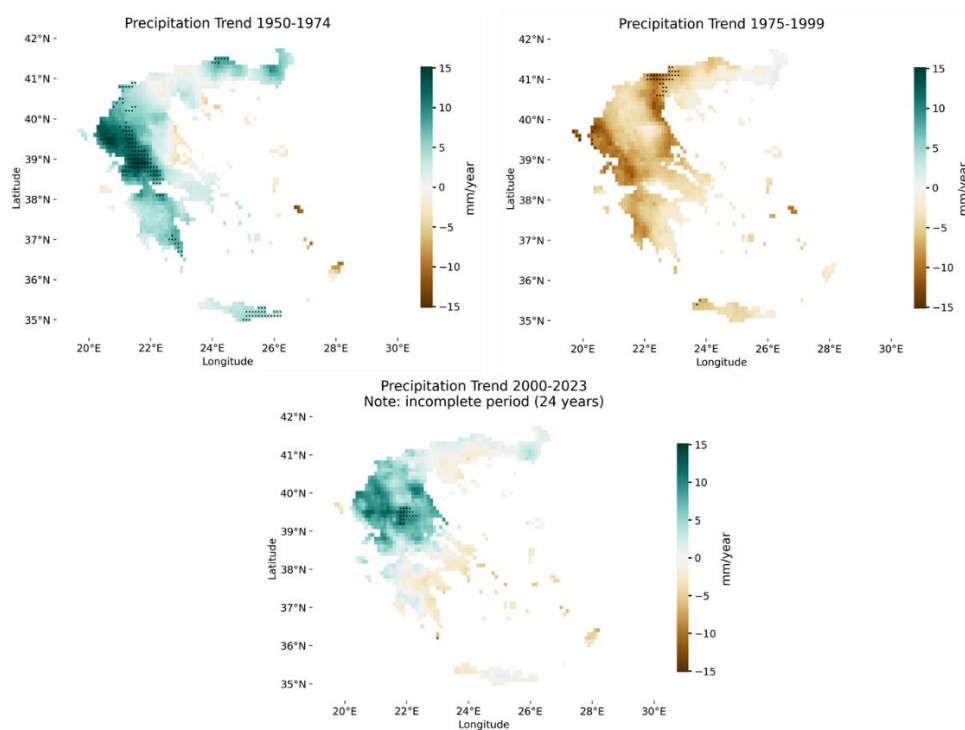
Αξίζει να σημειωθεί ότι παρά την κυριαρχία των αρνητικών τάσεων, υπάρχουν περιοχές όπως τμήματα της δυτικής Μακεδονίας, στην περιοχή του Ολύμπου, τμήματα στα νότια της οροσειράς της Πίνδου και στα ανατολικά της Κρήτης, όπου εμφανίζονται ασθενείς θετικές τάσεις. Παρότι οι τάσεις αύξησης δεν είναι στατιστικά σημαντικές, το συγκεκριμένο εύρημα έχει ιδιαίτερη αξία για μία περιοχή που στο μέλλον ενδέχεται να αποδειχτεί ευάλωτη σε συνθήκες ερημοποίησης. Συνολικά, η εικόνα αποτυπώνει επικράτηση της μείωσης του υετού κατά την περίοδο μελέτης, με χωρική διαφοροποίηση ως προς την ένταση και τη στατιστική σημαντικότητα των μεταβολών.

Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε συμφωνία με τα ευρήματα των Varlas et al. (2022), οι οποίοι χρησιμοποιώντας μηνιαίες τιμές υετού από τη βάση δεδομένων ERA5 εκτίμησαν τάσεις για την Ελλάδα και τις γύρω περιοχές (πάνω από ξηρά και θάλασσα) κατά την περίοδο 1950 – 2020. Διαπίστωσαν επικράτηση αρνητικών κυρίως τάσεων και υπολόγισαν για όλη την περιοχή μελέτης μία γενική τάση μείωσης ίση με -1.02 mm/yr , σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 93%. Οι διαχρονικές μεταβολές ακολουθούν ένα χωρικό πρότυπο ανάλογο με αυτό του Σχήματος 3.11, και οι στατιστικά σημαντικές τάσεις εντοπίζονται στις ίδιες περίπου περιοχές. Τάσεις μείωσης του υετού στην Ελληνική επικράτεια διαπιστώθηκαν και εκτιμήθηκαν και σε προηγούμενες μελέτες. Παράδειγμα, οι Feidas et al. (2007), διαπίστωσαν φθίνουσες τάσεις υετού αναλύοντας δεδομένα από 24 ελληνικούς μετεωρολογικούς σταθμούς επιφάνειας για την περίοδο 1955 - 2001. Ομοίως, οι Philandras et al. (2011) χρησιμοποιώντας δεδομένα από μετεωρολογικούς σταθμούς καθώς και ένα σετ δεδομένων σε πλεγματικά σημεία, προσδιόρισαν φθίνουσες τάσεις υετού σε ολόκληρο τον Ελλαδικό χώρο για την περίοδο 1951 - 2009. Οι Markonis et al. (2017) στηριζόμενοι σε μετρήσεις από 136 σταθμούς εδάφους εκτίμησαν μείωση του ετήσιου υετού στις περισσότερες περιοχές της Ελλάδας κατά την περίοδο 1940 - 2012. Η ερευνητική εργασία του Zittis (2017) που διερευνά την ύπαρξη τάσεων υετού στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου συμπεριλαμβανομένης της Μέσης Ανατολής και της Βόρειας Αφρικής, χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικές βάσεις δεδομένων με μετρήσεις εκφρασμένες σε πλεγματικά σημεία, αναφέρει τάσεις μείωσης του υετού στη Βαλκανική Χερσόνησο για την περίοδο 1901 – 2014, που κυμαίνονται μεταξύ -1.3 mm/decade και -3.5 mm/decade ανάλογα το σετ δεδομένων.

3.2.2 Ανάλυση ανά 25ετία

Η ανάλυση της διαχρονικής μεταβολής του υετού σε προηγούμενη ενότητα, έδειξε πως κατά την περίοδο μελέτης το ετήσιο ύψος του δεν παρέμενε σταθερό, ούτε μεταβαλλόταν μονότονα. Αναδείχτηκαν μεταβολές σε κλίμακα δεκαετιών και ο στατιστικός καθορισμός των σημείων καμπίς προσδιόρισε την 25-ετία ως αντιπροσωπευτική περίοδο των μεταβολών. Με βάση αυτό το εύρημα, για να διερευνηθεί πως οι διάφορες υποπερίοδοι συνέβαλαν στην διαμόρφωση της συνολικής τάσης του υετού το διάστημα 1950 – 2024, η ανάλυση των τάσεων πραγματοποιείται σε αυτή την ενότητα στη βάση 25-ετιών. Στο Σχήμα 3.12 που ακολουθεί φαίνονται οι χωρικές κατανομές των τάσεων του ετήσιου ύψους του υετού για κάθε μία από τις τρεις 25-ετίες της περιόδου μελέτης: 1950-1974, 1975-1999 και 2000-2023. Θα πρέπει να

σημειωθεί πως η τελευταία 25-ετία υπολείπεται ενός έτους καθώς η ανάλυση πραγματοποιείται με βάση τα υδρολογικά έτη. Στον Πίνακα 3.8 δίνονται οι μέγιστες θετικές και αρνητικές τάσεις που καταγράφηκαν σε κάθε 25-ετία.



Σχήμα 3.12 Χωρική κατανομή των τάσεων του νετού (σε mm/yr) ανά 25ετία, 1950-1974, 1975-1999, 2000-2023 (υπολείπεται ένα έτος στην τελευταία 25ετία καθώς χρησιμοποιούνται υδρολογικά έτη). Οι κουκίδες (●) αντιπροσωπεύουν στατιστικά σημαντικές τάσεις με $p < 0.05$.

Πίνακας 3.8 Μέγιστες αρνητικές και θετικές τιμές τάσεων νετού ανά 25ετία από το 1950 έως το 2023, υπολείπεται ένα έτος στην τελευταία 25ετία *.

	Maximum Negative Trend (mm/year)	Maximum Positive Trend (mm/year)
1950-1974	-12.88 -322.00 total	15.15 378.75 total
1975-1999	-13.64 -341.00 total	1.42 35.50 total
2000-2023*	-7.2 -172.80 total	12.92 310.08 total

Η ανάλυση των τάσεων του νετού ανά 25ετία αποκαλύπτει σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των επιμέρους περιόδων, υποδηλώνοντας μεταβολές στο καθεστώς του νετού της Ελλάδας. Κατά την περίοδο 1950–1974 παρατηρούνται κυρίως θετικές τάσεις στο μεγαλύτερο μέρος της χώρας και ιδιαίτερα στη δυτική Ελλάδα όπου οι εκτιμώμενες τάσεις είναι στατιστικά σημαντικές και υπερβαίνουν τα +5 mm/yr φτάνοντας μέχρι και τα +15 mm/yr.

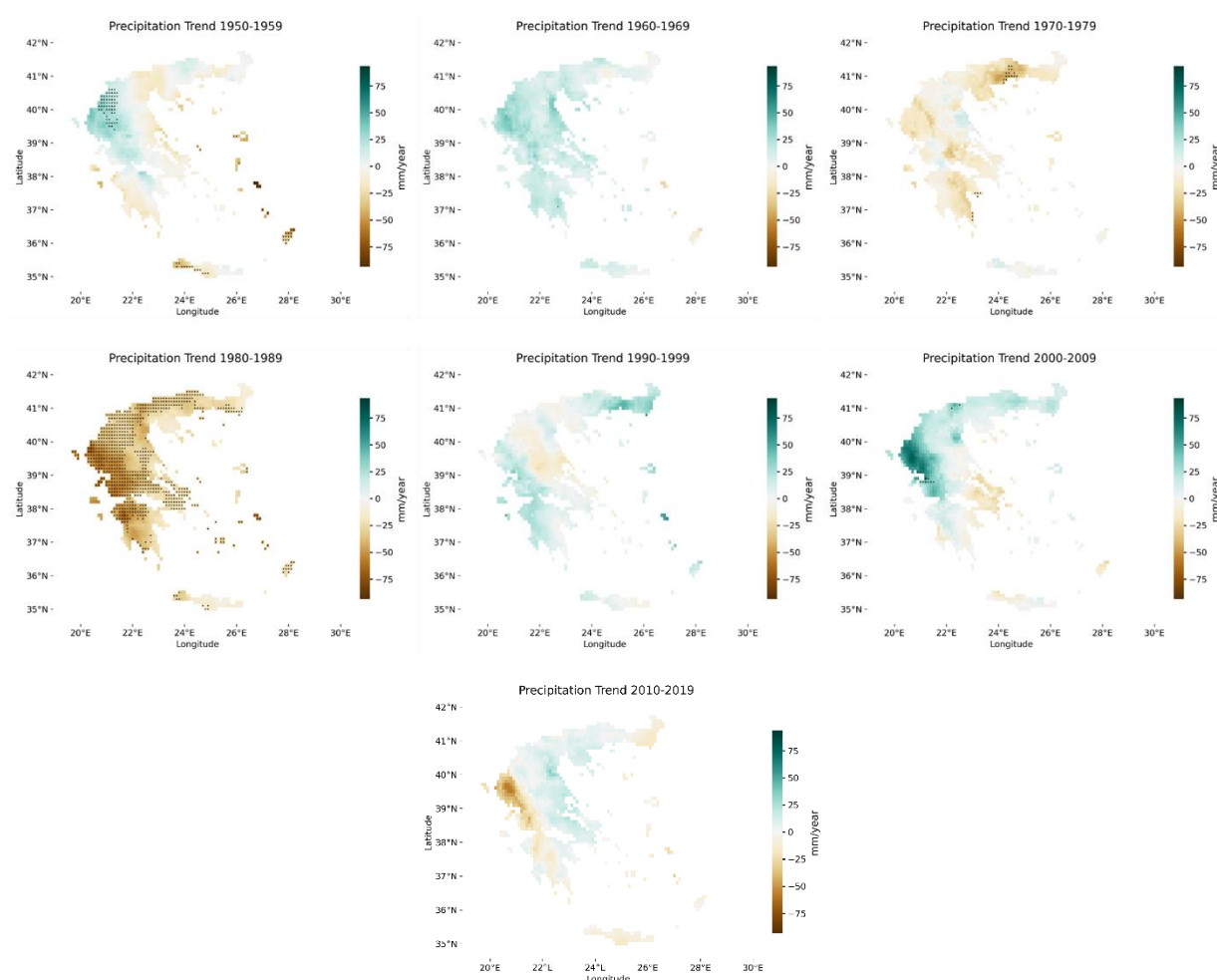
Οι στατιστικά σημαντικές θετικές τάσεις συνεπάγονται αύξηση του υετού κατά αυτή την περίοδο. Ωστόσο, στην ανατολική Θεσσαλία, την κεντρική Μακεδονία και το ανατολικό Αιγαίο καταγράφονται μικρές σχετικά αλλά αρνητικές τάσεις, οι οποίες είναι πιο έντονες (περίπου -10 mm/yr) στο νοτιοανατολικό Αιγαίο. Η επικράτηση σημαντικών τάσεων αύξησης το διάστημα 1950-1975, επιβεβαιώνουν τον χαρακτηρισμό της στην ανάλυση που προηγήθηκε, ως την πιο υγρή 25-ετία της περιόδου μελέτης.

Αντίθετα, κατά την περίοδο 1975–1999 καταγράφεται εκτεταμένη επικράτηση αρνητικών τάσεων σχεδόν σε ολόκληρο τον ελλαδικό χώρο, με μεγαλύτερη ένταση (μεταξύ -10 mm/yr και -15 mm/yr) στη δυτική Ελλάδα, σε τμήματα της κεντρικής Μακεδονίας, στα παράλια της Θεσσαλίας αλλά και σε νησιά του νότιο-ανατολικού Αιγαίου. Η περίοδος αυτή χαρακτηρίζεται από γενικευμένη μείωση του υετού και αποτελεί την πιο ξηρή 25-ετία της περιόδου 1955-1974.

Στην πιο πρόσφατη περίοδο (2000–2023), παρατηρείται μερική ανάκαμψη των τιμών υετού, με την εμφάνιση θετικών τάσεων, όχι όμως σε όλη την επικράτεια. Αύξηση του υετού με ρυθμό που κυμαίνεται μεταξύ $+5$ και $+10 \text{ mm/yr}$, σημειώνονται κυρίως στη βορειοδυτική Ελλάδα, τη δυτική Μακεδονία, τη δυτική Στερεά Ελλάδα και τη Θεσσαλία. Πιο ασθενείς θετικές τάσεις εντοπίζονται στην περιοχή της Θράκης και στη βορειοδυτική Πελοπόννησο. Στο υπόλοιπο της χώρας οι τάσεις είναι ασθενείς μεν, αλλά αρνητικές ($< -5 \text{ mm/yr}$). Σε κάθε περίπτωση, οι τάσεις αύξησης του υετού στην ηπειρωτική Ελλάδα και κυρίως στις περιοχές που καταγράφονται τα μεγαλύτερα ύψη, αποτελεί ενθαρρυντικό εύρημα στα πλαίσια της εξελισσόμενης κλιματικής αλλαγής.

3.2.3 Ανάλυση ανά 10ετία

Μετά τα αποτελέσματα των 25ετιών, σημαντική κρίνεται η ανάλυση των τάσεων και σε επίπεδο δεκαετιών, με σκοπό την περαιτέρω και πιο διακριτή διερεύνηση των τάσεων όπου αποκαλύπτεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια η χρονική εξέλιξη του υετού στον ελλαδικό χώρο. Έτσι, στις εικόνες του Σχήματος 3.13 αποτυπώνονται οι χωρικές κατανομές των τάσεων του ετήσιου ύψους του υετού για τις επτά δεκαετίες της περιόδου μελέτης, στον Πίνακα 3.9 δίνονται οι μέγιστες θετικές και αρνητικές τάσεις που καταγράφηκαν σε κάθε δεκαετία.



Σχήμα 3.13 Χωρική κατανομή των τάσεων του υετού (σε mm/yr) ανά δεκαετία από το 1950 έως το 2019. Οι κουκίδες (●) αντιπροσωπεύουν στατιστικά σημαντικές τάσεις με $p < 0.05$.

Πίνακας 3.9 Μέγιστες αρνητικές και θετικές τιμές τάσεων υετού ανά 10ετία από το 1950 έως το 2019.

	Maximum Negative Trend (mm/year)	Maximum Positive Trend (mm/year)
1950-1959	-93.47	40.56
1960-1969	-29.75	42.69
1970-1979	-47.85	19.38
1980-1989	-70.91	-1.09
1990-1999	-23.16	59.64
2000-2009	-29.61	80.94
2010-2019	-58.11	35.99

Η πρώτη δεκαετία της περιόδου μελέτης, η δεκαετία του 1950, δεν εμφανίζει ομοιογενείς τάσεις σε όλη τη χώρα. Σημαντικές τάσεις αύξησης του υετού εμφανίζονται στα βορειοδυτικά και λιγότερο έντονες σε περιοχές στα δυτικά, ενώ τάσεις μείωσης σημειώνονται στην υπόλοιπη χώρα, οι οποίες είναι πιο έντονες στο ανατολικό και νότιο Αιγαίο. Η δεκαετία του '60, η οποία στην ανάλυση που προηγήθηκε ταυτοποιήθηκε ως η πιο υγρή δεκαετία της περιόδου μελέτης, χαρακτηρίζεται από έντονες τάσεις αύξησης του υετού (που κυμαίνονται κατά κύριο λόγο στα 25-35 mm/year) στο σύνολο σχεδόν της χώρας. Αυτές οι θετικές τάσεις του υετού εξηγούν και τα αυξημένα ποσά στη συγκεκριμένη δεκαετία. Η δεκαετία του 1970 εμφανίζει ένα μεταβατικό χαρακτήρα, με αναστροφή των θετικών τάσεων και εμφάνιση αρνητικών μεταβολών στο μεγαλύτερο μέρος της χώρας. Μάλιστα, βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές μεταβολές στην ανατολική Μακεδονία και την ανατολική Πελοπόννησο. Η δεκαετία του 1980 ξεχωρίζει ως η περίοδος με τις εντονότερες και πιο εκτεταμένες αρνητικές τάσεις σε ολόκληρη τη χώρα, αποκαλύπτοντας την σημαντική μείωση του υετού, όπου στις περισσότερες περιοχές βρέθηκε να είναι στατιστικά σημαντική. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός πώς κατά τη δεκαετία αυτή, όλα τα πλεγματικά σημεία αποτελούνται από τάσεις με αρνητικές τιμές, οι οποίες σε αρκετές περιοχές υπερβαίνουν τα -50 mm/yr, ενώ σε κάποια πλεγματικά σημεία αγγίζουν τα -70 mm/yr. Οι σημαντικές τάσεις μείωσης του υετού τη δεκαετία του '80 την καθιστούν ως την πιο ξηρή δεκαετία της περιόδου μελέτης. Τη δεκαετία του 1990 παρατηρείται ανασχεση της τάσης μείωσης του υετού και αποτυπώνεται η έναρξη μιας τάσης ανάκαμψης στην δυτική και ανατολική Ελλάδα. Η αυξητική τάση του υετού παγιώνεται και ισχυροποιείται στη βόρεια και κεντρική ηπειρωτική χώρα κατά την πρώτη δεκαετία του 2000. Ωστόσο, στην νότια Ελλάδα συμπεριλαμβανομένης της ανατολικής στερεάς Ελλάδας παρουσιάζονται αρνητικές τάσεις. Τη δεκαετία του 2010 καταγράφεται μια εκ νέου αναστροφή της τάσης, από θετικές σε αρνητικές τιμές, στη δυτική και ανατολική Ελλάδα. Ασθενείς θετικές τάσεις διατηρούνται στα βόρεια της χώρας και στα ανατολικά ηπειρωτικά.

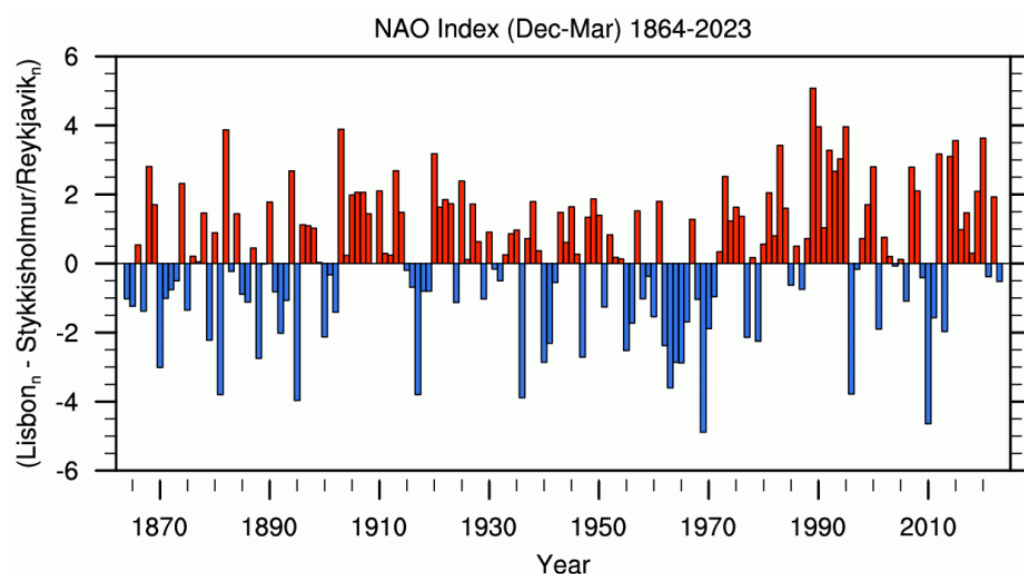
Συνολικά, η δεκαετής ανάλυση επιβεβαιώνει τη διαδοχή τριών βασικών φάσεων: περίοδος αύξησης του υετού (1950–1969), περίοδος έντονης μείωσης (1970–μέσα του 1990)

και περίοδος μερικής ανάκαμψης (μέσα του 1990–σήμερα), ενισχύοντας την εικόνα μη γραμμικής μεταβολής του υετού στον ελλαδικό χώρο.

Αντίστοιχα συμπεράσματα σχετικά με τη διαχρονική μεταβολή των τάσεων του υετού σε κλίμακα δεκαετιών στην ευρύτερη περιοχή της Ελλάδας, αναφέρθηκαν και από άλλες μελέτες. Παράδειγμα, οι Markonis et al. (2017) διαπίστωσαν στις περισσότερες περιοχές του Ελλαδικού χώρου μία τάση μείωσης μετά το 1950, ακολουθούμενη από αύξηση μετά το 1980, ενώ οι τάσεις παρέμεναν σταθερές στο διάστημα από τα τέλη του '90 έως το 2012. Οι Hatzianastassiou et al. (2008) χρησιμοποιώντας δορυφορικά δεδομένα από το Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), ανέφεραν τάση μείωσης του υετού από τα τέλη του '70 έως τα τέλη της δεκαετίας του '80, η οποία αναστράφηκε κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990 μέχρι τις αρχές του 2000, ακολουθούμενη από φθίνουσα πορεία μέχρι το 2004. Μεταβολές των τάσεων του υετού σε επίπεδο δεκαετιών, στη Βαλκανική χερσόνησο, αποκάλυψε η ανάλυση τριών σετ δεδομένων υετού που κάλυπταν χρονική περίοδο εκατονταετίας από τον Zittis (2017). Συγκεκριμένα, αναφέρει τάση αύξησης το διάστημα 1901-1930, η οποία ακολουθείται από μικρή τάση μείωσης την περίοδο 1931-1960. Η μείωση του υετού ενισχύεται και γίνεται περισσότερο έντονη την τριαντακονταετία 1961-1990, ενώ η τάση αναστρέφεται με αύξηση του υετού την τελευταία περίοδο 1991-2014. Η αύξηση του υετού στο μεγαλύτερο μέρος του Ελλαδικού χώρου τις τελευταίες δεκαετίες επιβεβαιώθηκε και από πρόσφατες ερευνητικές εργασίες. Οι Lagouvardos et al. (2024), χρησιμοποιώντας δεδομένα επανανάλυσης ERA5-land για την περίοδο 1991 – 2020, υπολόγισαν αυξητικές τάσεις σχεδόν για το σύνολο της χώρας, οι οποίες για αρκετές περιοχές ήταν στατιστικά σημαντικές και για την περιοχή της Ηπείρου και των Ιονίων νήσων έφταναν τιμές της τάξης των 12 – 15 /yr. Μάλιστα, απέδωσαν την θετική τάση στη σημαντική αύξηση του υετού στη βορειοδυτική Ελλάδα κατά τη δεκαετία 2011-2020. Σε μία πρόσφατη ερευνητική εργασία των Retalis et al. (2026), αναλύονται οι τάσεις του υετού στην Ελληνική επικράτεια κατά την περίοδο 1981 – 2020 χρησιμοποιώντας δύο βάσεις δεδομένων: τα δεδομένα επανανάλυσης ERA5-land και δεδομένα (E-OBS) προερχόμενα από μετρήσεις σε σταθμούς επιφάνειας εκφρασμένα σε σημεία πλέγματος από τη βάση δεδομένων European Climate Assessment and Dataset (ECA&D). Και τα δύο σετ δεδομένων έδωσαν τάση μείωσης για το συνολικό ετήσιο υετό κατά τη περίοδο (1981-2020). Η τάση ήταν ασθενείς για τα δεδομένα ERA5-land και πιο ισχυρή για τα δεδομένα E-OBS. Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι τα δύο σετ δεδομένων δίνουν αντίθετες τάσεις (αύξηση σύμφωνα με τα ERA5-land και μείωση σύμφωνα με τα E-OBS) για την περιοχή της βορειοδυτικής Ελλάδας. Η ανάδειξη τέτοιων αντιθέσεων μεταξύ των διαφόρων βάσεων δεδομένων αναδεικνύει την ανάγκη E-OBS ελέγχου αξιοπιστίας των δεδομένων με υψηλής ποιότητας μετρήσεις.

Οι ισχυρές τάσεις μείωσης του υετού κατά τη δεκαετία του 1980 αναφέρεται τόσο στις προαναφερθείσες αναλύσεις όσο και σε προγενέστερες (π.χ. Feidas et al., 2006; Varlas et al., 2022; Philandras et al., 2011). Οι συγκεκριμένες αρνητικές τάσεις συνδέθηκαν με εμμονή της κύμανσης του Βορείου Ατλαντικού (NAO) στη θετική του φάση. Γενικότερα, η διαχρονική μεταβολή του υετού στην Ελλάδα και στη Μεσόγειο συνδέεται με χαρακτηριστικά της Κύμανσης του Βορείου Ατλαντικού και συσχετίζεται με αυτή μέσω του δείκτη NAO (North Atlantic Oscillation – NAO) (Hatzianastassiou et al, 2016 ; Philandras et al., 2011), αλλά όχι αποκλειστικά σε αυτό καθώς το NAO δεν είναι ο μοναδικός “driver” της περιοχής.

Εκείνη η δεκαετία χαρακτηρίζεται από επικράτηση θετικών τιμών του δείκτη NAO όπως αποτυπώνεται και στο Σχήμα 3.14, όπου κατά τη θετική φάση του, η ενίσχυση των δυτικών ανέμων μετατοπίζει τα βαρομετρικά συστήματα προς βορειότερα γεωγραφικά πλάτη, οδηγώντας σε μείωση της συχνότητας και έντασης των συστημάτων που επηρεάζουν την περιοχή της Μεσογείου και κατ' επέκταση την Ελλάδα (Feidas et al., 2006 ; Hurrell and van Loon, 1997). Η μετέπειτα τάση ανάκαμψης του νετού από τη δεκαετία του 1990 και έπειτα, ενδέχεται να σχετίζεται και εδώ με μεταβολές στη φάση και την ένταση του NAO, καθώς και με την αυξημένη μεταβλητότητα της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας στην περιοχή της Μεσογείου.

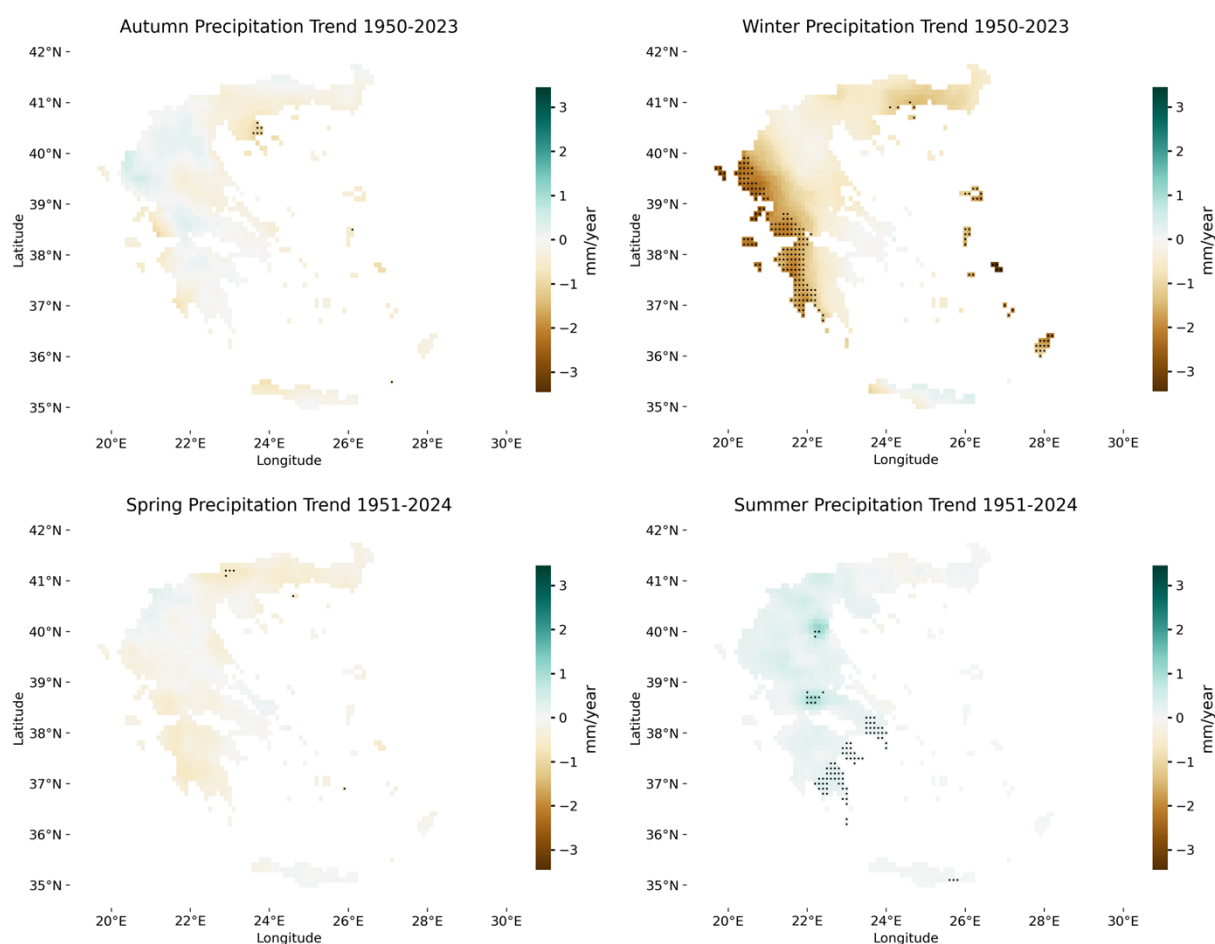


Σχήμα 3.14 Διαχρονική μεταβολή του δείκτη NAO για τον Χειμώνα (Δεκέμβριο έως Μάρτιο). Ο δείκτης υπολογίστηκε από την διαφορά της κανονικοποιημένης ατμοσφαιρικής πίεσης στο επίπεδο της θάλασσας (SLP) μεταξύ της Λισαβόνας- Πορτογαλία, και του Stykkisholmur/Reykjavik-Ισλανδία, από το 1864 έως το 2023 (www.climatedataguide.ucar.edu).

3.2.4 Εποχική Ανάλυση

Σε προηγούμενη ενότητα διαπιστώθηκε κατά την περίοδο μελέτης, η επικράτηση τάσεων μείωσης του ετήσιου υετού στην πλειονότητα των περιοχών του Ελλαδικού χώρου, με ορισμένες εκ των οποίων να είναι στατιστικά σημαντικές. Δεδομένου ότι η κύρια συμβολή στο ετήσιο ύψος υετού προέρχεται κυρίως από φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες, η διερεύνηση των διαχρονικών τάσεων του υετού επεκτάθηκε σε εποχική και μηνιαία βάση.

Η χωρική κατανομή των εποχικών τάσεων του υετού όπως υπολογίστηκαν για τη όλη την περίοδο μελέτης (υδρολογικά έτη της περιόδου 1950-2024) σε κάθε πλεγματοτικό σημείο, αποτυπώνεται στο Σχήμα 3.15. Στον Πίνακα 3.10 αναφέρονται οι μέγιστες θετικές και αρνητικές τάσεις που υπολογίστηκαν για κάθε εποχή.



Σχήμα 3.15 Χωρική κατανομή των τάσεων του υετού (σε mm/yr) κατά την περίοδο 1950 – 2023 για κάθε εποχή του έτους. Οι κουκίδες (●) αντιπροσωπεύουν στατιστικά σημαντικές τάσεις με $p < 0.05$.

Πίνακας 3.10 Μέγιστες αρνητικές και θετικές τιμές τάσεων υετού ανά εποχή από το 1950 έως το 2024.

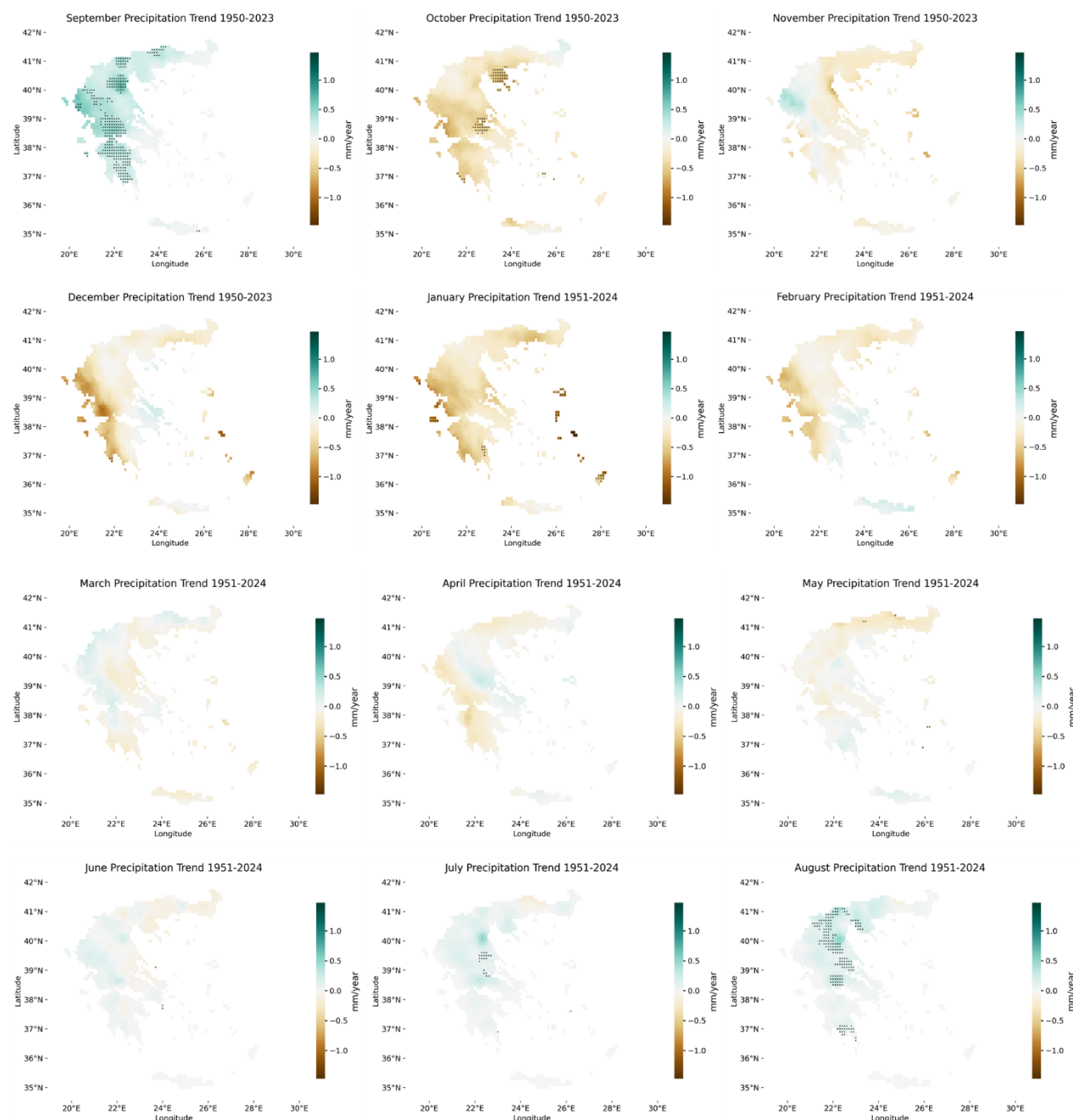
	Maximum Negative Trend (mm/year)	Maximum Positive Trend (mm/year)
Autumn	-1.07 -79.18 total	0.55 40.70 total
Winter	-3.45 -255.30 total	0.40 29.60 total
Spring	-0.69 -51.06 total	0.31 22.94 total
Summer	-0.19 -14.06 total	1.16 85.84 total

Η εποχική ανάλυση των τάσεων του υετού για την περίοδο 1950–2023 αναδεικνύει σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των εποχών, δείχνοντας πως η συνολική μεταβολή του υετού δεν είναι ομοιόμορφη καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Κατά τη χειμερινή περίοδο όπου σημειώνονται και τα μεγαλύτερα ποσά υετού, παρατηρούνται σχεδόν στο σύνολο της χώρας αρνητικές τάσεις. Οι τάσεις αυτές είναι περισσότερο έντονες και στατιστικά σημαντικές (> -2 mm/yr έως περίπου -3.5 mm/yr) στα νησιά του Ιονίου, στη δυτική-νοτιοδυτική ηπειρωτική Ελλάδα και στο νότιο και ανατολικό Αιγαίο. Είναι χαρακτηριστικό πως στην ανατολική ηπειρωτική χώρα και γενικά στις περιοχές όπου σημειώνεται το ελάχιστο του υετού οι τάσεις είναι μεν αρνητικές αλλά πολύ μικρές ή κοντά στο μηδέν. Ελαφρώς θετικές τάσεις υπολογίστηκαν στην ανατολική Κρήτη. Το θέρος, ο υετός εμφανίζει σε όλη τη χώρα πολύ μικρές θετικές τάσεις (< 1 mm/yr) έως μηδενικές. Παρόλα αυτά βρέθηκαν να είναι στατιστικά σημαντικές στην ανατολική Πελοπόννησο, την ανατολική Κρήτη και την Αττική, καθώς και στην κεντρική Στερεά Ελλάδα και την περιοχή του Ολύμπου όπου είναι και οι πιο έντονες (περίπου 1.2 mm/yr, Πίνακας 3.10). Αντίθετα με το Χειμώνα και το Καλοκαίρι, τις μεταβατικές εποχές του έτους η χωρική κατανομή των τάσεων δεν είναι ομοιογενής. Το Φθινόπωρο, ασθενείς τάσεις αύξησης του υετού (< 1 mm/yr) υπολογίστηκαν στην βορειοδυτική Ελλάδα και τη δυτική Μακεδονία, την κεντρική και ανατολική Στερεά Ελλάδα, όπως και στην κεντρική και ανατολική Πελοπόννησο, ενώ στην υπόλοιπη χώρα κατεγράφησαν πολύ μικρές φθίνουσες τάσεις και μόνο στην ανατολική Χαλκιδική εκτιμήθηκαν ως στατιστικά σημαντικές. Την Άνοιξη, οι τάσεις του υετού είτε φθίνουσες είτε αυξητικές, είναι πολύ μικρές και σε αρκετές περιοχές κοντά στο μηδέν, ενώ δεν εκτιμήθηκαν ως στατιστικά σημαντικές.

Τα ευρήματα της εποχικής ανάλυσης των τάσεων υποδηλώνουν ότι η μείωση του υετού στην Ελλάδα οφείλεται κατά κύριο λόγο στη μείωση του υετού τον Χειμώνα. Το ίδιο συμπέρασμα εξήχθη και από προγενέστερες εργασίες (παράδειγμα Feidas et al., 2006; Varlas et al., 2022), ενώ οι Philandras et al. (2011) προσδιόρισαν σημαντικές τάσεις μείωσης με σημαντική συμβολή στις ετήσιες τάσεις, την υγρή περίοδο (Οκτώβριο με Μάρτιο), η οποία περιλαμβάνει τον Χειμώνα.

3.2.5 Μηνιαία ανάλυση

Συνεχίζοντας την ανάλυση των τάσεων του νετού σε μηνιαία βάση, στο Σχήμα 3.16 παρουσιάζεται η γεωγραφική τους κατανομή για κάθε μήνα του έτους, ενώ στον Πίνακα 3.11 αναφέρονται οι μέγιστες θετικές και αρνητικές τάσεις που υπολογίστηκαν στον Ελλαδικό χώρο.



Σχήμα 3.16 Χωρική κατανομή των τάσεων του νετού (σε mm/yr) κατά την περίοδο 1950 – 2024 για κάθε μήνα του έτους. Οι κουκκίδες (●) αντιπροσωπεύουν στατιστικά σημαντικές τάσεις με $p < 0.05$.

Πίνακας 3.11 Μέγιστες αρνητικές και θετικές τιμές τάσεων υετού ανά μήνα από το 1950 έως το 2024.

	Maximum Negative Trend (mm/year)	Maximum Positive Trend (mm/year)
September	0.0 0 total	0.74 54.76 total
October	-0.79 -58.46 total	0.16 11.84 total
November	-0.72 -53.28 total	0.42 31.08 total
December	-1.14 -84.36 total	0.22 16.28 total
January	-1.47 -108.78 total	0.02 1.48 total
February	-0.71 -52.54 total	0.26 19.24 total
March	-0.38 -28.12 total	0.23 17.02 total
April	-0.46 -34.04 total	0.29 21.46 total
May	-0.42 -31.08 total	0.14 10.36 total
June	-0.19 -14.06 total	0.22 16.28 total
July	-0.21 -15.54 total	0.5 37.00 total
August	-0.13 -9.62 total	0.53 39.22 total

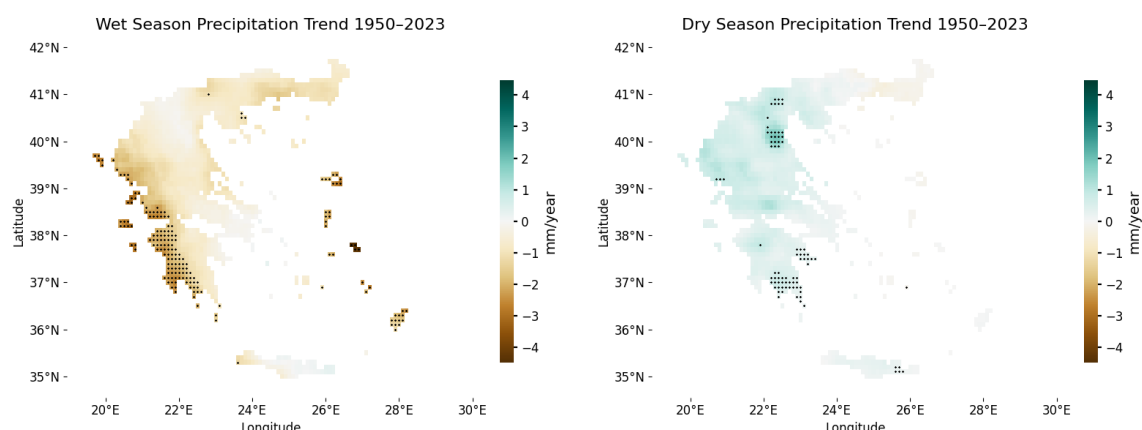
Η ανάλυση των τάσεων σε μηνιαία βάση, αποκαλύπτει τα εξής. Το Φθινόπωρο, η ανομοιογενής γεωγραφική κατανομή των τάσεων που εξήχθη από την ανάλυση που προηγήθηκε σε εποχιακό επίπεδο, με ασθενείς θετικές και αρνητικές ή ακόμη και ουδέτερες (μηδενικές) τάσεις, οφείλεται στη αντίθετη συμπεριφορά μεταξύ Σεπτεμβρίου και Οκτωβρίου. Συγκεκριμένα, ο Σεπτέμβριος εμφανίζει θετικές τάσεις σε όλη τη χώρα, οι οποίες είναι μεν ασθενείς, καθώς δεν υπερβαίνουν το + 1 mm/yr, αλλά στατιστικά σημαντικές σε αρκετές περιοχές. Αντίθετα, ο Οκτώβριος παρουσιάζει τάσεις μείωσης του υετού στο μεγαλύτερο μέρος της επικράτειας, με εξαίρεση την ανατολική Θράκη. Ο Νοέμβριος χαρακτηρίζεται επίσης από αρνητικές τάσεις στις περισσότερες περιοχές, μικρότερες όμως σε σχέση με του Οκτωβρίου. Εξαίρεση αποτελεί η βορειοδυτική Ελλάδα όπου εμφανίζονται θετικές, μη στατιστικά σημαντικές όμως, τάσεις. Συνεπώς, ενώ στην εποχική ανάλυση αποτυπώνει μια ουδέτερη εικόνα για το Φθινόπωρο, η μηνιαία προσέγγιση αναδεικνύει αντίθετες τάσεις τους επιμέρους μήνες, οι οποίες συνθέτουν το τελικό εποχικό αποτέλεσμα. Οι χειμερινοί μήνες έχουν πιο

συνεπή μεταξύ τους εικόνα καθώς χαρακτηρίζονται ως επί το πλείστον από αρνητικές τάσεις. Συγκεκριμένα, τον Ιανουάριο η τάση μείωσης του υετού είναι καθολική σε όλη την Ελλάδα, ενώ τον Δεκέμβριο και τον Φεβρουάριο μηδενικές τάσεις ανιχνεύονται στα ανατολικά της Πίνδου και ελαφρώς αυξητικές στην ανατολική Στερεά Ελλάδα, τις Κυκλάδες, την Κρήτη και την ανατολική Πελοπόννησο. Η ομοιογένεια που παρατηρείται μεταξύ των μηνών έχει σαν αποτέλεσμα οι χωρικές κατανομές να προσομοιάζουν αρκετά με την αντίστοιχη εποχική του Χειμώνα. Επιπλέον, ενώ σε επίπεδο μήνα οι τάσεις δεν βρέθηκαν σημαντικές, η σύνθεσή τους σε εποχική βάση αναδεικνύει περιοχές (π.χ. δυτική Ελλάδα) με στατιστικά σημαντικές τάσεις, Την Άνοιξη, η χωρική κατανομή των τάσεων του υετού είναι διαφορετική μεταξύ των τριών μηνών, εμφανίζοντας μάλιστα αντίθετα μοτίβα σε ορισμένες περιοχές, γεγονός που εξηγεί την ανομοιογένεια της εποχικής κατανομής. Παράδειγμα, τον Μάρτιο εμφανίζονται μικρές αυξητικές τάσεις στη δυτική και βορειοδυτική Ελλάδα και αρνητικές στη Θεσσαλία, ενώ τον Απρίλιο το μοτίβο αυτό αντιστρέφεται. Τον Μάιο, μείωση καταγράφεται κυρίως στα βόρεια της χώρας και μικρή αύξηση στα νότια. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των μηνών είναι η μικρή, μη στατιστικά σημαντική, τιμή των τάσεων (είτε θετικών είτε αρνητικών), οι οποίες δεν ξεπερνούν τα $\pm 0.5 \text{ mm/yr}$ αντίστοιχα.

Τους θερινούς μήνες, ο Ιούνιος εμφανίζει εξαιρετικά ασθενείς τάσεις, θετικές και αρνητικές, οι οποίες σε αρκετές περιοχές προσεγγίζουν το μηδέν. Ο Ιούλιος και ο Αύγουστος παρουσιάζουν μεγαλύτερη μεταξύ τους συνοχή, με επικράτηση μικρών αλλά σταθερά θετικών τάσεων αύξησης του υετού σχεδόν σε όλη τη χώρα. Μάλιστα τον Αύγουστο, οι τάσεις αυτές είναι στατιστικά σημαντικές σε αρκετές περιοχές. Ο συνδυασμός των πολύ μικρών τάσεων τον Ιούνιο και των σταθερά θετικών τάσεων του Ιουλίου και Αυγούστου, έχει ως αποτέλεσμα την καθολική επικράτηση θετικών τάσεων σε εποχικό επίπεδο.

3.2.6 Ανάλυση σε υγρή και ξηρή περίοδο

Στις εικόνες του Σχήματος 3.17 απεικονίζεται η χωρική κατανομή των τάσεων του υετού στον Ελλαδικό χώρο κατά την περίοδο 1950 – 2023 (στη βάση υδρολογικών ετών) για την υγρή (Νοέμβριος-Μάρτιος) και ξηρή (Μάιος-Σεπτέμβριος) περίοδο του έτους.



Σχήμα 3.17 Χωρική κατανομή των τάσεων του νετού (σε mm/yr) κατά την περίοδο 1950 – 2023 για την υγρή και ξηρή περίοδο του έτους. Οι κουκίδες (●) αντιπροσωπεύουν στατιστικά σημαντικές τάσεις με $p < 0.05$.

Πίνακας 3.12 Μέγιστες αρνητικές και θετικές τιμές τάσεων νετού για τη χειμερινή και θερινή περίοδο (1950-2023).

Wet Season		
	Maximum Negative Trend (mm/year)	Maximum Positive Trend (mm/year)
1950-2023	- 4.46 - 330.04 total	0.32 23.68 total
Dry Season		
	Maximum Negative Trend (mm/year)	Maximum Positive Trend (mm/year)
1950-2023	- 0.48 - 35.52 total	1.92 142.08 total

Η σύγκριση των τάσεων του νετού μεταξύ της υγρής (Νοέμβριος-Μάρτιος) και της ξηρής (Μάιος-Σεπτέμβριος) περιόδου αναδεικνύει σαφείς διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά του νετού. Κατά την υγρή περίοδο, παρατηρούνται αρνητικές τάσεις στο μεγαλύτερο μέρος της χώρας, ιδιαίτερα στα δυτικά-νοτιοδυτικά τμήματα και στο ανατολικό Αιγαίο όπου υπερβαίνουν το -1 mm/yr και μπορεί να αγγίζουν -4 mm/yr (Πίνακας 3.12). Σε πολλές περιοχές οι τάσεις μείωσης εκτιμήθηκαν ως στατιστικά σημαντικές. Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ότι η συνολική μείωση του νετού στην Ελλάδα συνδέεται κυρίως με τη μείωση του χειμερινού νετού. Επίσης, η χωρική κατανομή των τάσεων του νετού την υγρή περίοδο, προσομοιάζει αρκετά με την αντίστοιχη του ετήσιου ύψους, ενισχύοντας περαιτέρω τη διαπίστωση πως οι διαχρονικές μεταβολές του νετού της υγρής περιόδου είναι αυτές που διαμορφώνουν τις τάσεις της ετήσιου νετού. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης βρίσκονται σε συμφωνία με τα ευρήματα των Philandras et al. (2011), οι οποίοι αναλύοντας τις τάσεις του νετού στη Μεσόγειο για δύο περιόδους, 1901-2009 και 1951-2009, διαπίστωσαν τον καθοριστικό ρόλο της υγρής περιόδου στη διαμόρφωση της διαχρονικής μεταβολής του ετήσιου νετού.

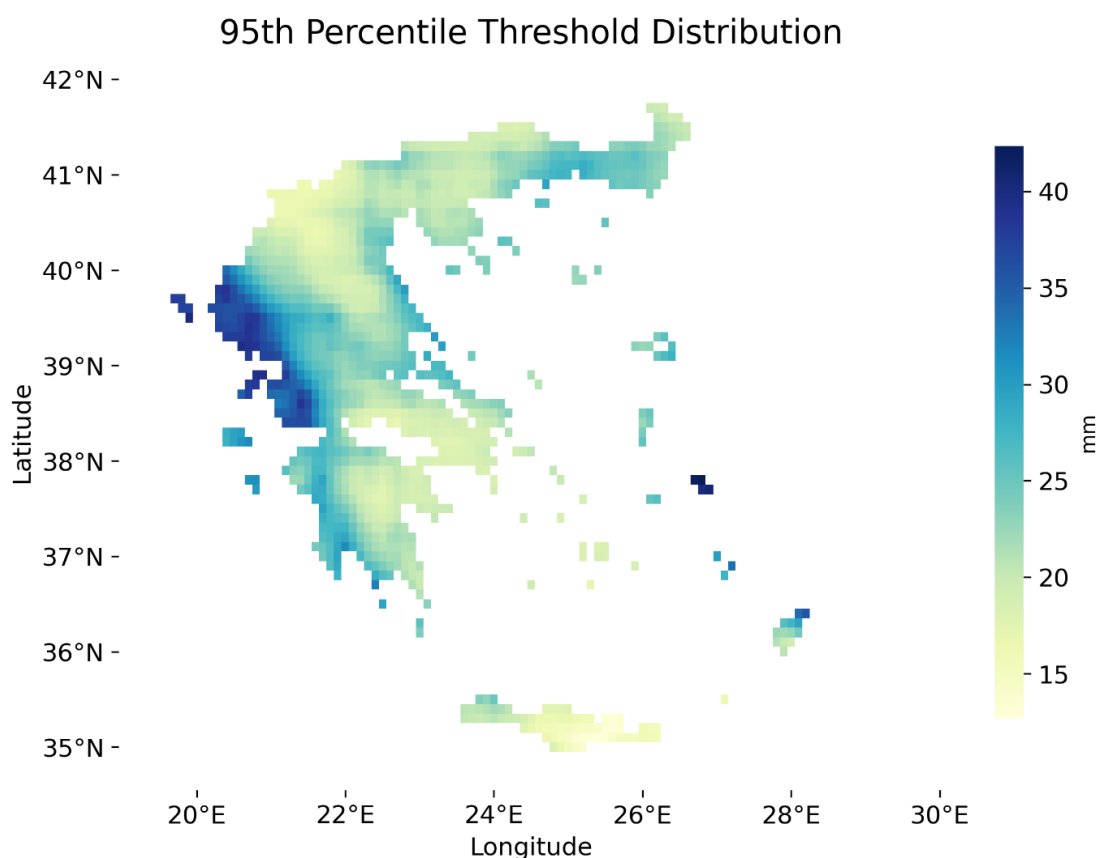
Αντίθετα, κατά τη ξηρή περίοδο εμφανίζονται κυρίως θετικές τάσεις στο μεγαλύτερο μέρος της χώρας, με αξιοσημείωτο την περιοχή του Ολύμπου όπου χαρακτηρίζεται από έντονες θετικές τιμές αλλά και από στατιστική σημαντικότητα.

Συμπερασματικά, η ανάλυση των τάσεων του υετού στον ελλαδικό χώρο για την περίοδο 1950–2023 ανέδειξε ότι η διαχρονική του μεταβολή δεν χαρακτηρίζεται από γραμμική συμπεριφορά, αλλά από έντονες χρονικές και χωρικές διαφοροποιήσεις. Παρότι για το σύνολο της περιόδου επικρατούν κυρίως αρνητικές τάσεις, οι οποίες υποδηλώνουν γενική μείωση του ετήσιου υετού, η ένταση των μεταβολών διαφοροποιείται σημαντικά μεταξύ των περιοχών με τις ισχυρότερες και στατιστικά σημαντικές τάσεις να εντοπίζονται κυρίως στη δυτική και νοτιοδυτική Ελλάδα, καθώς και σε τμήματα του ανατολικού και νότιου Αιγαίου. Η πρώτη 25ετία (1950–1974) χαρακτηρίζεται από γενικευμένες τάσεις αύξησης του υετού, ενώ κατά την περίοδο 1975–1999 επικρατούν εκτεταμένες αρνητικές τάσεις σχεδόν σε ολόκληρη τη χώρα. Στην πιο πρόσφατη περίοδο (2000–2023) παρατηρείται μερική ανάκαμψη του υετού, κυρίως στη βορειοδυτική και κεντρική ηπειρωτική Ελλάδα. Αντίστοιχα, η ανάλυση σε δεκαετή βάση ανέδειξε ως πλέον υγρή τη δεκαετία του 1960 και ως ξηρή τη δεκαετία του 1980, επιβεβαιώνοντας τον μη γραμμικό χαρακτήρα της διαχρονικής εξέλιξης του υετού. Η εποχική και μηνιαία ανάλυση ανέδειξε ότι η συνολική μείωση του ετήσιου υετού οφείλεται κυρίως στη μείωση του χειμερινού υετού και γενικότερα του υετού της υγρής περιόδου, ενώ κατά τη θερμή περίοδο οι τάσεις είναι κατά κύριο λόγο ασθενείς ή και τοπικά θετικές. Παράλληλα, η ανάλυση σε μηνιαία βάση ανέδειξε ότι οι επιμέρους μήνες κάθε εποχής δύναται να εμφανίζουν διαφορετική εικόνα από την εποχή συνολικά.

3.3 Προσδιορισμός Επεισοδίων Ακραίου Υετού και Ανάλυση των Διαχρονικών Τάσεων Μεταβολής τους

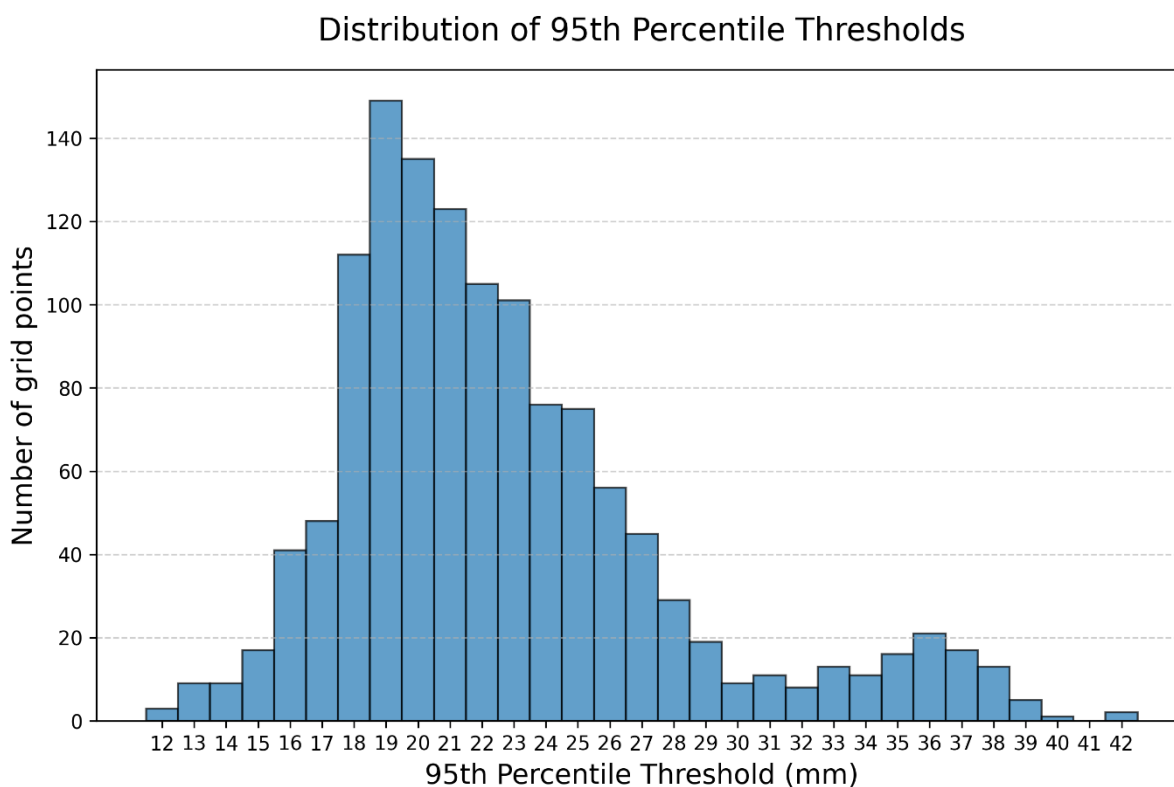
Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η χωρική κατανομή των τάσεων μεταβολής των τιμών των δεικτών ακραίου υετού R95pDays, R95p και R95pTOT για ολόκληρη τη χρονική περίοδο 1950-2024, αλλά και για μικρότερες χρονικές περιόδους, συγκεκριμένα ανά 25-ετίες και ανά 10-ετίες. Για κάθε ένα πλεγματικό σημείο, από τα 1279 που καλύπτουν τον χερσαίο ελληνικό χώρο, υπολογίστηκαν ετήσιες (υδρολογικό έτος) τιμές των δεικτών ακραίου υετού με τη χρήση κατωφλίου που αντιστοιχεί στο 95ο εκατοστημόριο της κατανομής των τιμών ημερήσιου αθροιστικού υετού της περιόδου 1950-2024, όπως αναλυτικά περιγράφεται στην ενότητα της Μεθοδολογίας.

Η διερεύνηση του ακραίου υετού αποτελεί σημαντικό αντικείμενο της κλιματικής ανάλυσης, καθώς τα γεγονότα αυτά συνδέονται με σημαντικές περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις, όπως πλημμύρες. Ο προσδιορισμός των δεικτών σε υψηλή χωρική ανάλυση (σημεία πλέγματος) αφενός λαμβάνει υπόψη τα τοπικά κλιματικά χαρακτηριστικά και αφετέρου επιτρέπει τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών περιοχών.



Σχήμα 3.18 Χωρική κατανομή κατωφλίων του 95ου εκατοστημορίου, 1950 έως το 2023.

Η γεωγραφική κατανομή των κατωφλίων στα 1279 πλεγματικά σημεία που καλύπτουν τον ελλαδικό χώρο αποτυπώνεται στο Σχήμα 3.18. Όπως είναι αναμενόμενο, προσομοιάζει τη γεωγραφική κατανομή της μέσης τιμής του ετήσιου αθροιστικού υετού για την περίοδο 1950-2024. Οι υψηλότερες τιμές κατωφλίου (34 με 38 mm) εντοπίζονται στη δυτική Ελλάδα, στην ομβροπλευρά της οροσειράς της Πίνδου ενώ σχετικά υψηλές τιμές (περί τα 25 mm) έχουν υπολογιστεί κατά μήκος της οροσειράς της Πίνδου, στη νοτιοδυτική Ελλάδα στην ομβροπλευρά των ορεινών όγκων της Πελοποννήσου, στη βόρεια Ελλάδα όπου εκτείνεται η οροσειρά της Ροδόπης, στα παράλια της Πιερίας και της Θεσσαλίας, στα νησιά του ανατολικού Αιγαίου καθώς και στη δυτική Κρήτη. Στις υπόλοιπες περιοχές όπως η δυτική και κεντρική Μακεδονία, η Θεσσαλία, η ανατολική Στερεά Ελλάδα, η Ανατολική Πελοπόννησος, τα νησιά του κεντρικού Αιγαίου και η ανατολική Κρήτη οι τιμές του κατωφλίου λαμβάνουν χαμηλές τιμές (περί τα 15 mm).



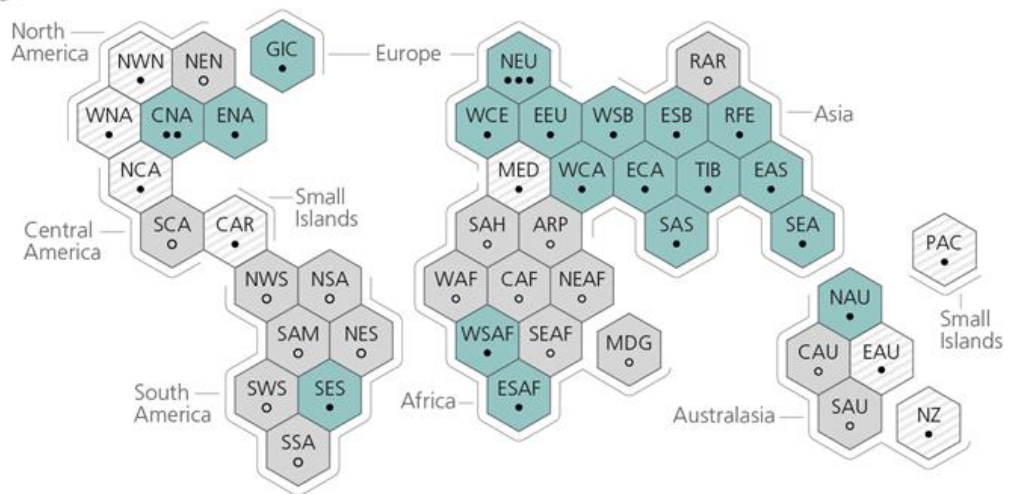
Σχήμα 3.19 Απεικόνιση σε ραβδόγραμμα της κατανομής κατωφλίων του 95ου εκατοστημορίου από το 1950 έως το 2023.

Η κατανομή συχνοτήτων των 1279 τιμών κατωφλίου (Σχ. 3.19) παρουσιάζει ένα πρωτεύον μέγιστο στην τιμή 19 mm το οποίο φαίνεται να προκύπτει από τις σχετικά χαμηλές τιμές που υπολογίστηκαν για ένα μεγάλο μέρος του χερσαίου ελλαδικού χώρου (δυτική και κεντρική Μακεδονία, Θεσσαλία, ανατολική Στερεά Ελλάδα, Ανατολική Πελοπόννησος, νησιά του κεντρικού Αιγαίου και ανατολική Κρήτη). Το δευτερεύον μέγιστο (36 mm) φαίνεται να προκύπτει από τις υψηλότερες τιμές κατωφλίου που υπολογίστηκαν για τις περιοχές που βρίσκονται στη δυτική Ελλάδα στην ομβροπλευρά της Πίνδου. Γενικότερα, περίπου τα 2/3

των τιμών κατωφλίου συγκεντρώνεται περίπου στο εύρος 18–25 mm, γεγονός που δείχνει ότι στο μεγαλύτερο μέρος της χώρας το κατώφλι για τον προσδιορισμό των γεγονότων ακραίου υετού είναι σχετικά χαμηλό, ενώ στο υπόλοιπο 1/3 περίπου της χώρας (στις ορεινές περιοχές και στις ομβροπλευρές των οροσειρών) το κατώφλι για να χαρακτηριστεί ένα γεγονός υετού ως ακραίο ξεπερνά τα 25 mm φτάνοντας σε κάποια πλεγματικά σημεία τα 40 με 42 mm.

Τόσο η χωρική κατανομή των τιμών κατωφλίου, όσο και η κατανομή των συχνοτήτων τους, επιβεβαιώνουν τη χωρική ανομοιογένεια και την τοπικότητα του υετού στον ελλαδικό χώρο και αναδεικνύουν την ανάγκη χρήσης υψηλής ανάλυσης δεδομένων για τη μελέτη των φαινομένων ακραίου υετού. Λαμβάνοντας υπόψη την περισσότερη πρόσφατη αναφορά της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC, 2023), σύμφωνα με την οποία η περιοχή της Μεσογείου χαρακτηρίζεται από μεγάλη αβεβαιότητα ως προς το εάν τα γεγονότα ακραίου υετού αυξάνονται ή μειώνονται, η ανάγκη χρήσης υψηλής ανάλυσης δεδομένων γίνεται περισσότερο επιτακτική, καθώς μπορεί να συμβάλει στην εξαγωγή συμπερασμάτων υψηλότερης ακρίβειας και βεβαιότητας σχετικά με τη διαχρονική πορεία των φαινομένων ακραίου υετού.

Heavy precipitation



IPCC AR6 WGI reference regions:

North America: **NWN** (North-Western North America), **NEN** (North-Eastern North America), **WNA** (Western North America), **CNA** (Central North America), **ENA** (Eastern North America), **Central America:** **NCA** (Northern Central America), **SCA** (Southern Central America), **CAR** (Caribbean), **South America:** **NWS** (North-Western South America), **NSA** (Northern South America), **NES** (North-Eastern South America), **SAM** (South American Monsoon), **SWS** (South-Western South America), **SES** (South-Eastern South America), **SSA** (Southern South America), **Europe:** **GIC** (Greenland/Iceland), **NEU** (Northern Europe), **WCE** (Western and Central Europe), **EEU** (Eastern Europe), **MED** (Mediterranean), **Africa:** **MED** (Mediterranean), **SAH** (Sahara), **WAF** (Western Africa), **CAF** (Central Africa), **NEAF** (North Eastern Africa), **SEAF** (South Eastern Africa), **WSAF** (West Southern Africa), **ESAF** (East Southern Africa), **MDG** (Madagascar), **Asia:** **RAR** (Russian Arctic), **WSB** (West Siberia), **ESB** (East Siberia), **RFE** (Russian Far East), **WCA** (West Central Asia), **ECA** (East Central Asia), **TIB** (Tibetan Plateau), **EAS** (East Asia), **ARP** (Arabian Peninsula), **SAS** (South Asia), **SEA** (South East Asia), **Australasia:** **NAU** (Northern Australia), **CAU** (Central Australia), **EAU** (Eastern Australia), **SAU** (Southern Australia), **NZ** (New Zealand), **Small Islands:** **CAR** (Caribbean), **PAC** (Pacific Small Islands)

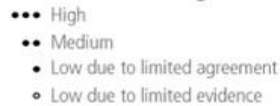
Dimension of Risk: Hazard

Key

Type of observed change since the 1950s



Confidence in human contribution to the observed change



Each hexagon corresponds to a region

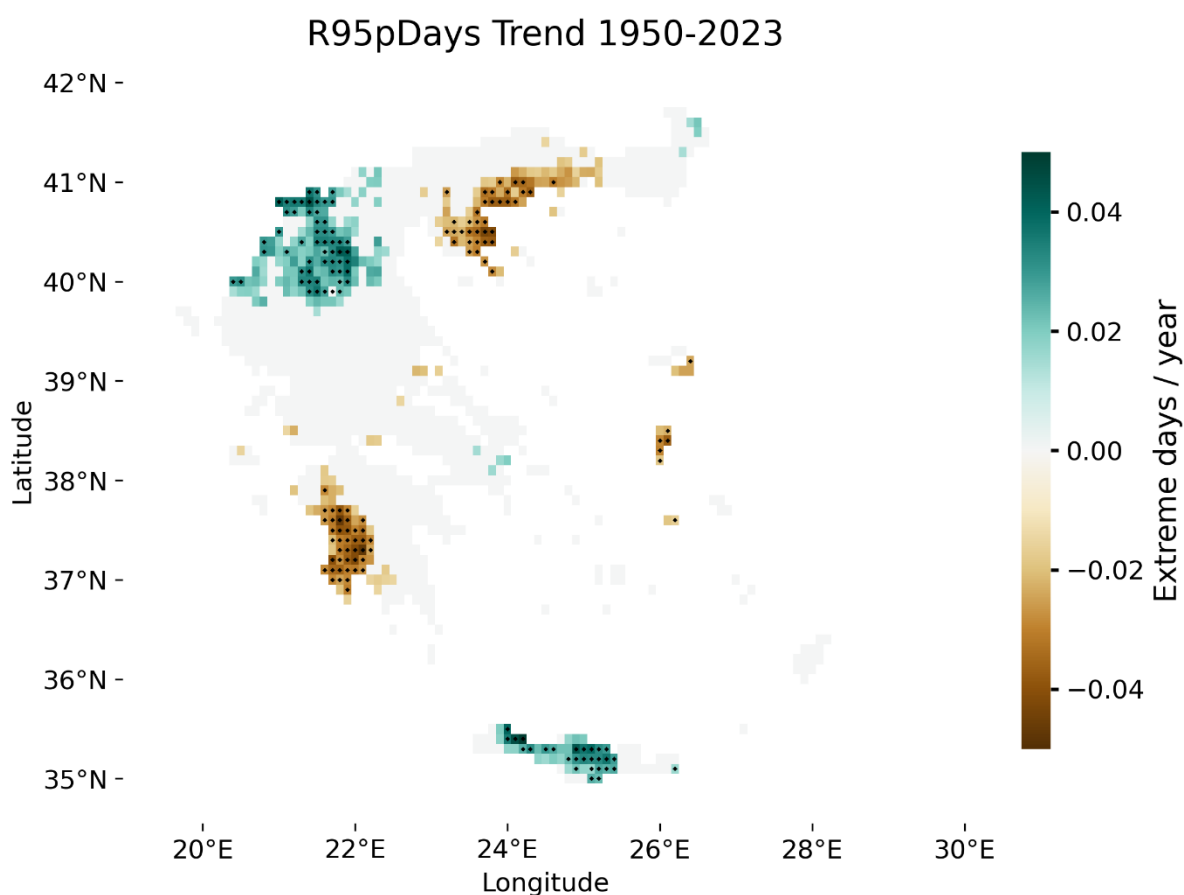


Σχήμα 3.20 Σύνθεση της αξιολόγησης των παρατηρούμενων αλλαγών του έντονου νετού και βαθμός βεβαιότητας για τη συμβολή του ανθρώπου στις παρατηρούμενες αλλαγές στις περιοχές του κόσμου, (IPCC, 2023, Fig. 2.3.1).

Η ανάλυση των δεικτών ακραίου υετού (R95pDays, R95p και R95pTOT), όπως ορίστηκαν στο κεφάλαιο της μεθοδολογίας, παρουσιάζεται στη συνέχεια.

3.3.1 Τάσεις του δείκτη R95pDays για όλη τη χρονική περίοδο μελέτης (1950-2023)

Στην πρώτη αυτή ενότητα, αναλύονται οι τάσεις του δείκτη R95pDays, ο οποίος υπολογίζει τον αριθμό ημερών ακραίου υετού στη χώρα.

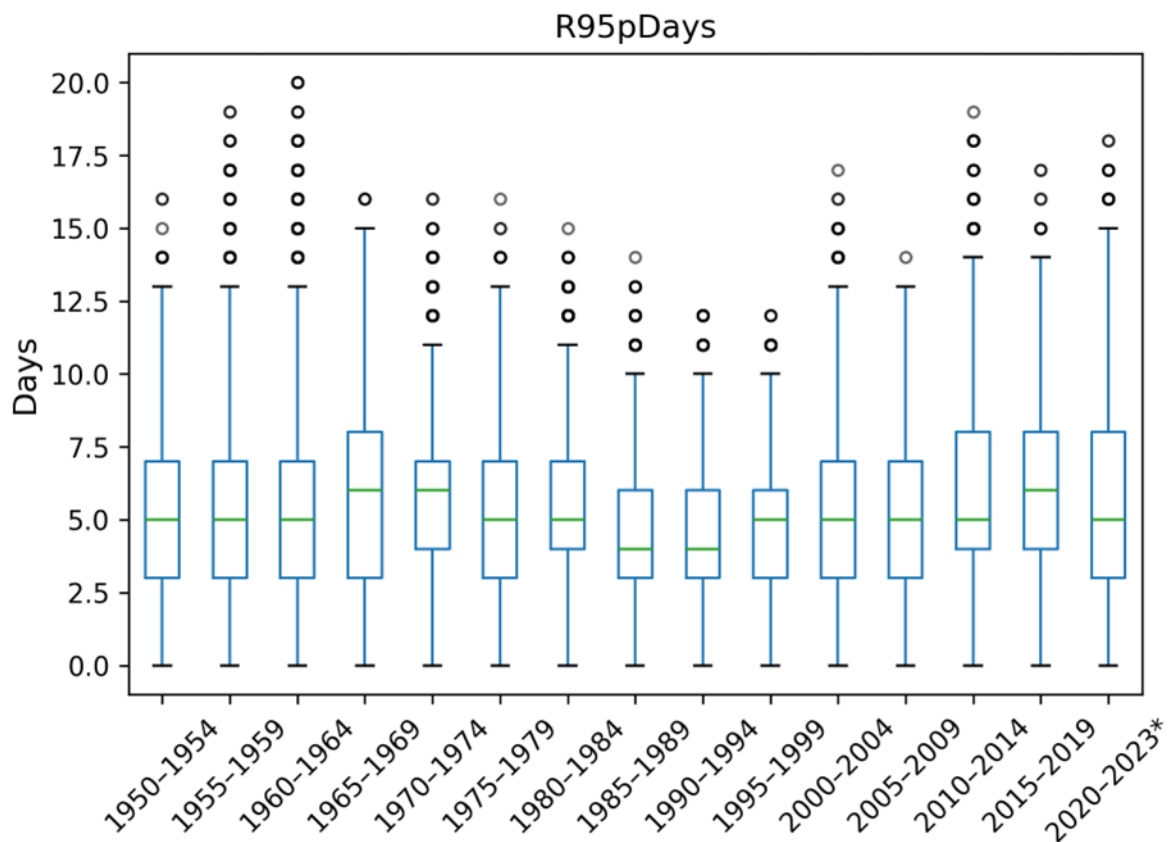


Σχήμα 3.21 Χωρική κατανομή των τάσεων του ετήσιου (υδρολογικό έτος) αριθμού ημερών ακραίου υετού, από το 1950 έως το 2023.

Πίνακας 3.13 Μέγιστες αρνητικές και θετικές τιμές τάσεων του συνόλου ημερών με ακραίο υετό από το 1950 έως το 2023.

	Maximum Negative Trend (days/year)	Maximum Positive Trend (days/year)
1950-2023	-0.04 -2.96 total	0.05 3.70 total

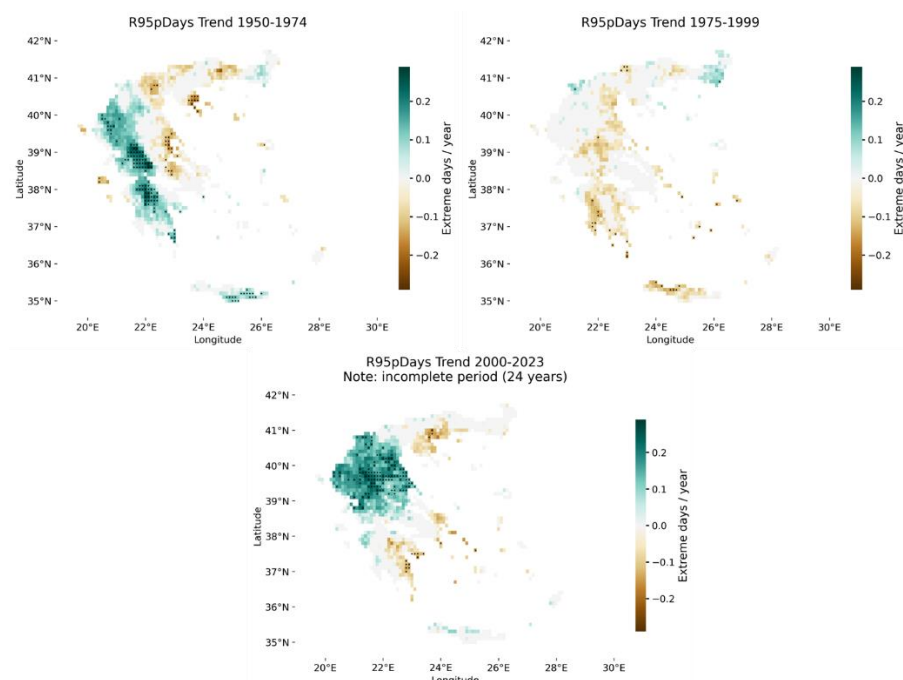
Η χωρική κατανομή των τάσεων του δείκτη R95pDays για την περίοδο 1950–2023 στον ελλαδικό χώρο παρουσιάζει έντονες διαφοροποιήσεις. Θετικές τάσεις, που δηλώνουν αύξηση της συχνότητας εμφάνισης ημερών με ακραίο υετό εντοπίζονται κυρίως στη βορειοδυτική Ελλάδα και στα κεντρικά και δυτικά της Κρήτης. Μάλιστα, στο μεγαλύτερο μέρος αυτών των περιοχών οι τάσεις εμφανίζονται στατιστικά σημαντικές, γεγονός που δηλώνει τη βεβαιότητα για την αύξηση της συχνότητας των φαινομένων ακραίου υετού. Αντίθετα, αρνητικές τάσεις παρατηρούνται σε τμήματα της κεντρικής και βόρειας Ελλάδας, καθώς και σε περιοχές της δυτικής και νότιας ηπειρωτικής χώρας, αλλά και σε ορισμένα νησιά του Αιγαίου, αποτυπώνοντας μείωση στον αριθμό των ημερών με ακραίο υετό. Οι αρνητικές αυτές τάσεις εμφανίζονται επίσης ως στατιστικά σημαντικές σε ορισμένες περιοχές, γεγονός που ενισχύει τη σημασία των μεταβολών αυτών. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι στατιστικά σημαντικές αρνητικές τάσεις στον ετήσιο αριθμό ημερών ακραίου υετού εντοπίζονται σε περιοχές (Χαλκιδική, ανατολική Μακεδονία, νοτιοδυτική Πελοπόννησος, νησιά του ανατολικού Αιγαίου) στις οποίες έχουν καταγραφεί επίσης στατιστικά σημαντικές αρνητικές τάσεις στις τιμές του ετήσιου (υδρολογικό έτος) αθροιστικού υετού (Σχ. 3.11). Αντίστοιχα, οι στατιστικά σημαντικές θετικές τάσεις του δείκτη R95pDays που έχουν υπολογιστεί για την περιοχή της δυτικής Μακεδονίας συμπίπτουν με τις θετικές τάσεις του υετού που παρατηρούνται σε αυτή την περιοχή (Σχ. 3.11). Ωστόσο, στη δυτική Κρήτη οι θετικές τάσεις του δείκτη R95pDays έρχονται σε αντίθεση με τις αρνητικές τάσεις των τιμών του ετήσιου αθροιστικού υετού, γεγονός που σημαίνει ότι η μείωση του αθροιστικού ετήσιου υετού δε συνεπάγεται πάντα και μείωση των φαινομένων ακραίου υετού.



Σχήμα 3.22 Θηκόγραμμα του δείκτη R95pDays, των ημερών ακραίου υετού από το 1950 έως το 2023.

Το θηκόγραμμα του δείκτη R95pDays αποτυπώνει τη χρονική μεταβολή της κατανομής του αριθμού ημερών ακραίου υετού ανά 5-ετίες κατά την περίοδο 1950-2023 (Σχήμα 3.22). Παρατηρείται ότι κατά τις πρώτες δεκαετίες (1950–1970) οι διάμεσες τιμές κυμαίνονται σε σχετικά υψηλότερα επίπεδα, υποδηλώνοντας αυξημένη συχνότητα ημερών ακραίων γεγονότων. Αντίθετα, κατά την περίοδο 1980–1990 καταγράφεται σαφής μείωση τόσο της διάμεσης τιμής όσο και της διασποράς, γεγονός που φανερώνει περιορισμό της συχνότητας και της μεταβλητότητας των ημερών ακραίου υετού. Από τις αρχές της δεκαετίας του 2000 και έπειτα, παρατηρείται εκ νέου αύξηση της διάμεσης τιμής και μεγαλύτερο εύρος τιμών με ενίσχυση της συχνότητας εμφάνισης των ακραίων γεγονότων και μεγαλύτερη μεταβλητότητα. Ομοίως, οι Lagouvardos et al. (2024) για την περίοδο 1991 – 2020 υπολογίζουν θετικές τάσεις για το ετήσιο πλήθος των ημερών με υετό άνω του ορίου των 20 mm στη δυτική Κρήτη, ωστόσο, γι’ αυτήν την περίοδο υπολογίζουν θετικές τάσεις και για τον ετήσιο (ημερολογιακό έτος) αθροιστικό υετό, γεγονός που ενδεχομένως οφείλεται στις θετικές τάσεις που έχουν υπολογιστεί και στην παρούσα εργασία για τη δεκαετία του 1990, οι οποίες ενδέχεται να υπερισχύουν των σχετικά μικρών αρνητικών τάσεων μεταβολής του ετήσιου (υδρολογικό έτος) αθροιστικού υετού των δεκαετιών του 2000 και του 2010. Συνεπώς, αναδεικνύεται η ανάγκη για ανάλυση σε επιμέρους υποπεριόδους 25-ετίας αλλά και 10-ετίας.

3.3.2 Τάσεις του δείκτη R95pDays ανά 25ετία



Σχήμα 3.23 Χωρική κατανομή των τάσεων του ετήσιου (υδρολογικό έτος) αριθμού ημερών ακραίου υετού, για τις 25-ετής περιόδους: 1950-1974, 1975-1999, 2000-2023. Στην τελευταία 25-ετία υπολείπεται ένα έτος.

Πίνακας 3.14 Μέγιστες αρνητικές και θετικές τιμές τάσεων των ημερών ακραίου υετού ανά 25ετία από το 1950 έως το 2023, υπολείπεται ένα έτος στην τελευταία 25ετία *.

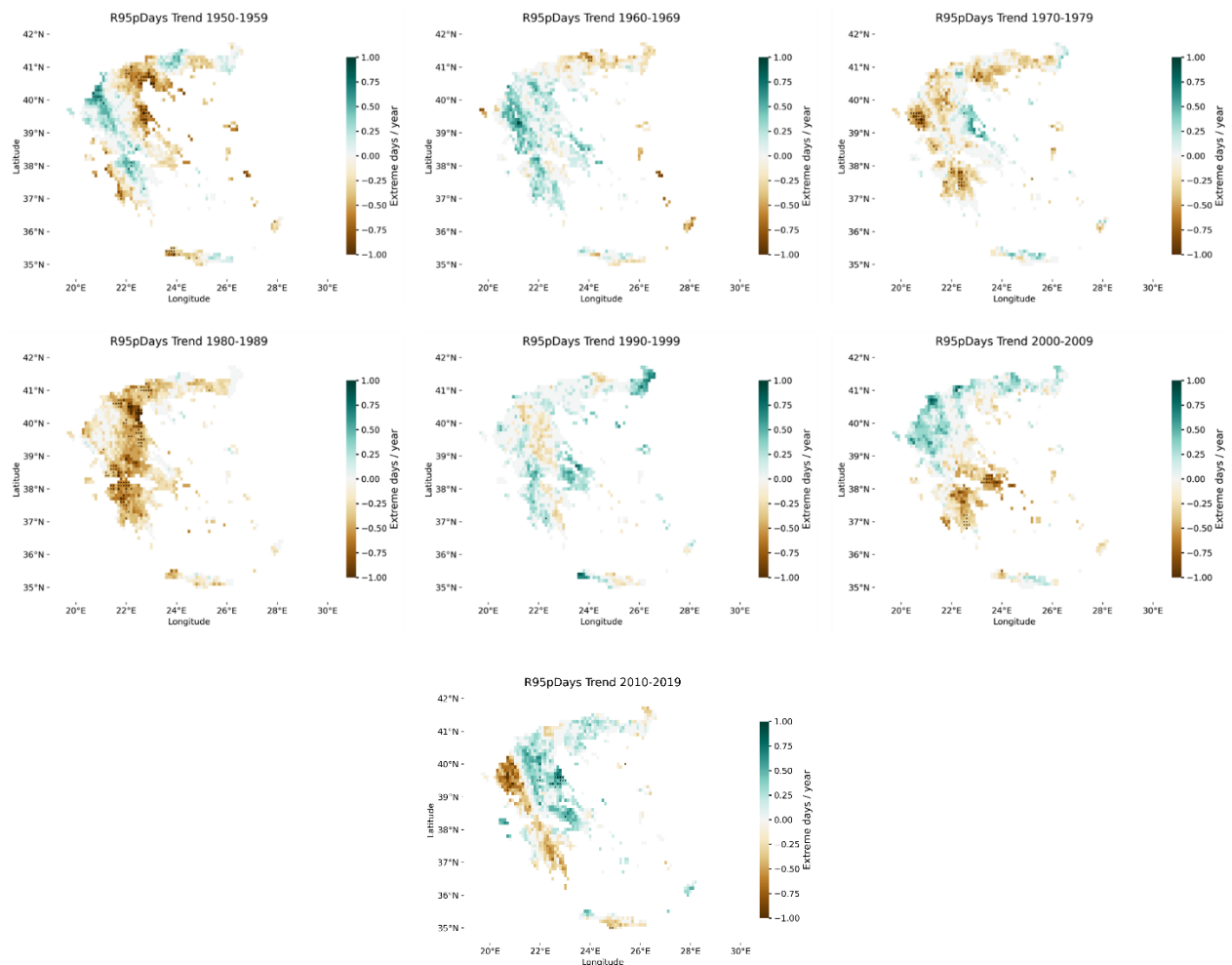
	Maximum Negative Trend (days/year)	Maximum Positive Trend (days/year)
1950-1974	-0.22 -5.50 total	0.28 7.00 total
1975-1999	-0.17 -4.25 total	0.13 3.25 total
2000-2023*	-0.18 -4.32 total	0.27 6.48 total

Η ανάλυση των τάσεων του δείκτη R95pDays στις επιμέρους χρονικές περιόδους αποκαλύπτει σημαντικές διαφοροποιήσεις στις τάσεις της συχνότητας εμφάνισης φαινομένων ακραίου υετού από τη μία περίοδο στην άλλη. Κατά την περίοδο 1950-1974 παρατηρούνται θετικές τάσεις σε όλη τη δυτική Ελλάδα, στην οροσειρά της Πίνδου, με τις υψηλότερες τιμές, οι οποίες εμφανίζονται στατιστικά σημαντικές, να έχουν υπολογιστεί στις ορεινές περιοχές στα όρια της Ηπείρου, της δυτικής ορεινής Θεσσαλίας και της δυτικής Στερεάς Ελλάδας, στην ορεινή δυτική Στερεά Ελλάδα, στα κεντρικά ορεινά της Πελοποννήσου και στην κεντρική και ανατολική Κρήτη. Αρνητικές, στατιστικά σημαντικές τάσεις του αριθμού ημερών ακραίου υετού ανά υδρολογικό έτος εμφανίζονται σε περιορισμένες περιοχές της κεντρικής Μακεδονίας και της Στερεάς Ελλάδας, και σε εκτεταμένες περιοχές στη Χαλκιδική και στην ανατολική Θεσσαλία. Αντίθετα, κατά την περίοδο 1975-1999, στο μεγαλύτερο μέρος του ελλαδικού χώρου οι τάσεις είναι σχεδόν μηδενικές, με θετικές τάσεις να εμφανίζονται μόνο στο νομό του Έβρου και τις αρνητικές τάσεις να υπερσχύουν χωρικά έναντι των θετικών και να καταγράφονται στην κεντρική Μακεδονία, στην ανατολική Θεσσαλία, στη βόρεια Στερεά Ελλάδα. Μάλιστα, σε περιορισμένες περιοχές, στα βόρεια της κεντρικής Μακεδονίας, στη νοτιοδυτική Πελοπόννησο, σε κάποια νησιά του κεντρικού Αιγαίου και στην κεντρική και δυτική Κρήτη οι αρνητικές τάσεις υπολογίστηκαν ως στατιστικά σημαντικές. Κατά την πιο πρόσφατη περίοδο 2000-2023, παρατηρούνται θετικές τάσεις σε αρκετά μεγάλο μέρος του χερσαίου ελλαδικού χώρου, συγκεκριμένα στη δυτική Μακεδονία, στην Ήπειρο, στη Θεσσαλία, και τη δυτική Στερεά Ελλάδα. Σε ορισμένες περιοχές αυτές οι τάσεις είναι σχετικά υψηλές και στατιστικά σημαντικές. Αντίθετα, στην ανατολική Μακεδονία, στη Χαλκιδική, στη νότια Εύβοια, στην Αττική στην ανατολική Πελοπόννησο καθώς και στα νησιά του κεντρικού Αιγαίου καταγράφονται αρνητικές τάσεις.

Λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις υπολογισμένες τάσεις για όλη την περίοδο μελέτης 1950-2024, όσο και αυτές που υπολογίστηκαν για τις επιμέρους 25-ετίες 1950-1974, 1975-1999 και 2000-2023, μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι στη βόρεια Ελλάδα (Χαλκιδική και δυτική Μακεδονία) και στα νησιά του ανατολικού Αιγαίου η μείωση του ετήσιου αριθμού ημερών ακραίου υετού είναι συνεχής σε όλη την περίοδο 1950-2024. Επίσης, συνεχής σε όλη την περίοδο 1950-2024 φαίνεται να είναι η αύξηση του ετήσιου αριθμού ημερών ακραίου υετού στη δυτική Μακεδονία και στις βορειότερες περιοχές της Ηπείρου και της Θεσσαλίας. Ωστόσο,

ασφαλές συμπέρασμα μπορεί να εξαχθεί από τη μελέτη των τάσεων σε ακόμη λεπτομερέστερη χρονική κλίμακα, όπως είναι οι δεκαετίες που ακολουθούν στην επόμενη υποενότητα.

3.3.3 Τάσεις του δείκτη R95pDays ανά 10ετία



Σχήμα 3.24 Χωρική κατανομή των τάσεων του ετήσιου (υδρολογικό έτος) αριθμού ημερών ακραίου υετού, για τις 10-ετής περιόδους: 1950-1959, 1960-1969, 1970-1979, 1980-1989, 1990-1999, 2000-2009, 2010-2019.

Πίνακας 3.15 Μέγιστες αρνητικές και θετικές τιμές τάσεων του αριθμού ημερών ακραίου υετού ανά 10ετία από το 1950 έως το 2019.

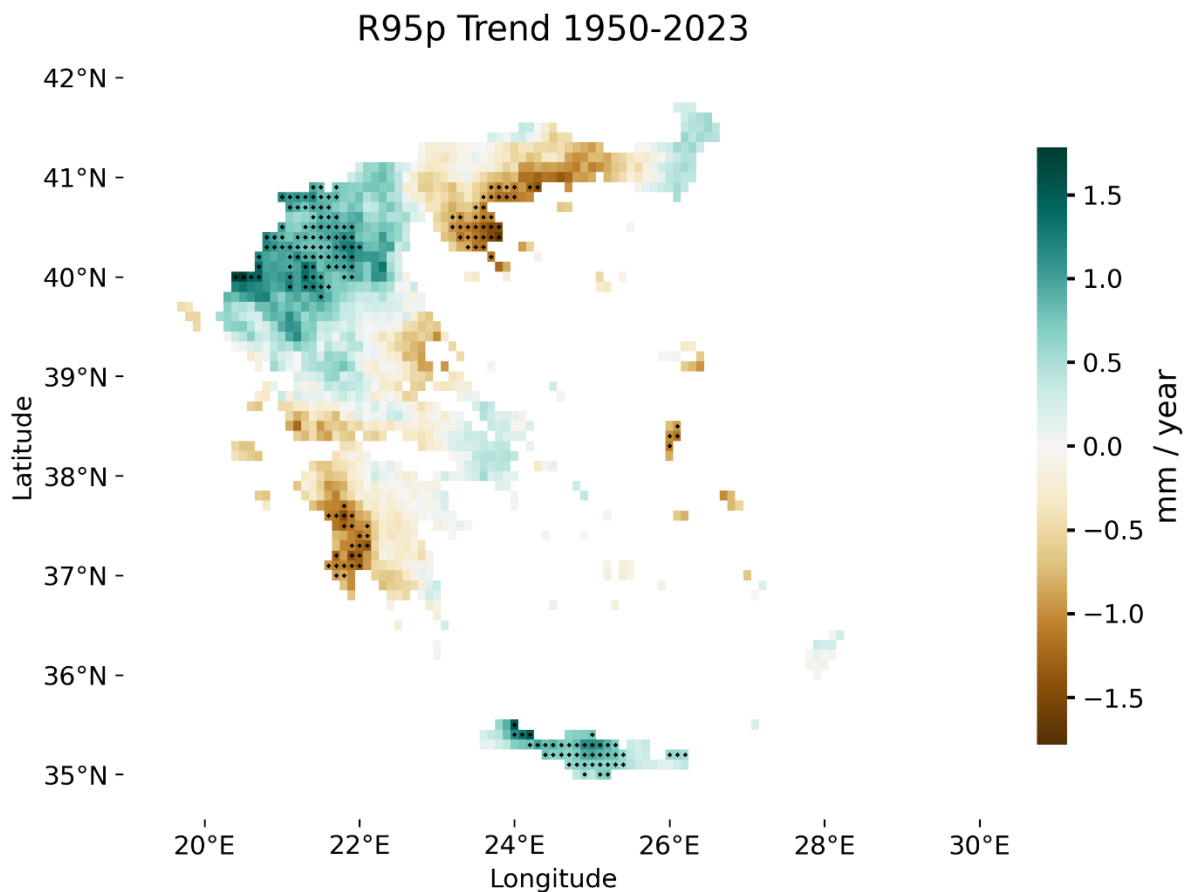
	Maximum Negative Trend (days/year)	Maximum Positive Trend (days/year)
1950-1959	-1.00	0.71
1960-1969	-0.83	1.00

1970-1979	-1.00	0.71
1980-1989	-1.00	0.25
1990-1999	-0.44	0.83
2000-2009	-0.87	0.87
2010-2019	-1.00	0.75

Η μελέτη των τάσεων του δείκτη R95pDays σε δεκαετή κλίμακα αναδεικνύει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τη χρονική εξέλιξη των μεταβολών του ετήσιου αριθμού ημερών ακραίου υετού. Έως το σημείο αυτό, έχοντας εντοπίσει ως περιοχές κύριου ενδιαφέροντος τη Χαλκιδική και την ανατολική Μακεδονία στη βόρεια Ελλάδα, τα νησιά του ανατολικού Αιγαίου και τη δυτική Πελοπόννησο με τάσεις μείωσης του ετήσιου αριθμού ημερών ακραίου υετού και τη δυτική Μακεδονία ως περιοχή με τάσεις αύξησης, γι' αυτές τις περιοχές παρατηρούνται τα παρακάτω. Στη Χαλκιδική και την ανατολική Μακεδονία, αν και σε χρονική κλίμακα 25-ετιών, φάνηκε η τάση μείωσης του δείκτη R95pDays να είναι συνεχής, στην κλίμακα των 10-ετιών φαίνεται ότι κατά την τελευταία δεκαετία κυρίως, η γενική τάση μείωσης ανατρέπεται με την εμφάνιση σε αυτές τις περιοχές σαφών τάσεων αύξησης. Στα νησιά του ανατολικού Αιγαίου η γενική τάση μείωσης του δείκτη R95pDays φαίνεται να ανατρέπεται προσωρινά μόνο τη δεκαετία του 1990. Στη δυτική Πελοπόννησο μικρές τάσεις αύξησης φαίνεται να εμφανίζονται κατά τις δεκαετίες του 1960 και του 1990. Στη δυτική Μακεδονία η γενική τάση αύξησης του ετήσιου αριθμού ημερών ακραίου υετού φαίνεται να ανατρέπεται προσωρινά τη δεκαετία του 1970, με τις μεγαλύτερες και στατιστικά σημαντικές αυξητικές τάσεις ωστόσο να έχουν υπολογιστεί για τις δύο τελευταίες δεκαετίες του 2000 και 2010. Στη δυτική Ελλάδα, στην ομβροπλευρά της οροσειράς της Πίνδου, περιοχή μεγάλου ενδιαφέροντος εξαιτίας των υψηλών τιμών ημερήσιου υετού και του μεγάλου ετήσιου αριθμού ημερών υετού, φαίνεται ότι κατά τις δεκαετίες του 1970 και του 2010 οι τάσεις είναι αρνητικές και σε ορισμένα σημεία στατιστικά σημαντικές, ενώ τις υπόλοιπες δεκαετίες της περιόδου 1950-2024 οι τάσεις είναι θετικές ή σχεδόν μηδενικές. Για την ανατολική Στερεά Ελλάδα και ιδιαιτέρως την Αττική, περιοχές επίσης μεγάλου ενδιαφέροντος, καθώς εκεί η πληθυσμιακή πυκνότητα είναι μεγάλη, αξίζει να επισημανθούν οι θετικές τάσεις του δείκτη R95pDays κατά την δεκαετία του 1990, οι επακόλουθες αρνητικές και στατιστικά σημαντικές αρνητικές τάσεις τη δεκαετία του 2000 και η επάνοδος σε θετικές τάσεις κατά την τελευταία δεκαετία του 2010. Αξίζει να επισημανθεί ότι αν και για την 25-ετή περίοδο 1975-1999 σχεδόν σε όλη την Ελλάδα οι τάσεις μεταβολής του δείκτη R95pDays υπολογίστηκαν σχετικά μικρές, η μελέτη των τάσεων σε λεπτομερέστερη χρονική κλίμακα, 10-ετών περιόδων, αναδεικνύει τις υψηλά αρνητικές τάσεις κατά τη δεκαετία του 1980 που υπολογίστηκαν για το μεγαλύτερο μέρος του ελλαδικού χερσαίου χώρου.

3.3.4 Τάσεις του δείκτη R95p για όλη τη χρονική περίοδο μελέτης (1950-2023)

Σε αυτή την ενότητα διερευνώνται οι τάσεις του δείκτη R95p, ο οποίος εκφράζει το ποσό ακραίου υετού που έχει δεχθεί μια περιοχή.



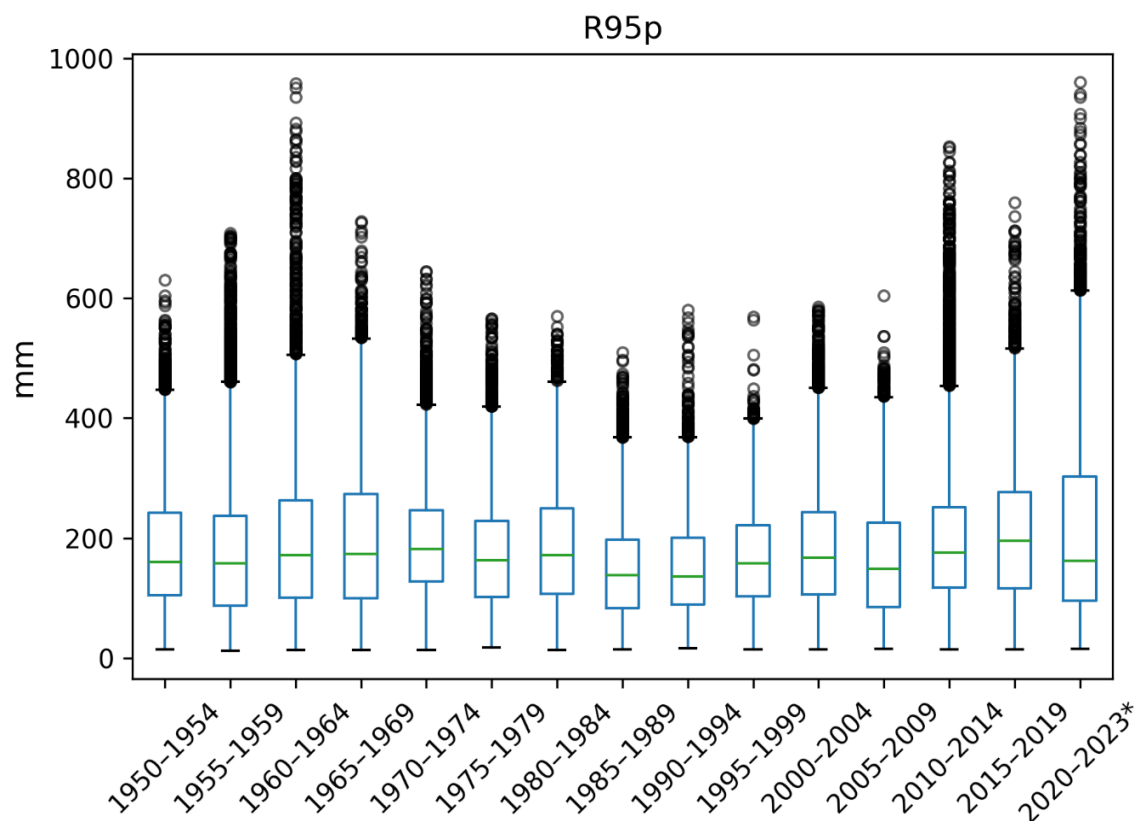
Σχήμα 3.25 Χωρική κατανομή των τάσεων του ετήσιου (υδρολογικό έτος) ακραίου υετού, από το 1950 έως το 2023.

Πίνακας 3.16 Μέγιστες αρνητικές και θετικές τιμές τάσεων ακραίου υετού από το 1950 έως το 2023.

	Maximum Negative Trend (mm/year)	Maximum Positive Trend (mm/year)
1950-2023	-1.66 -122.84 total	1.78 131.72 total

Όπως και στην περίπτωση του αριθμού των ημερών ακραίου υετού ανά υδρολογικό έτος (δείκτης R95pDays), έτσι και στην περίπτωση του συνολικού ακραίου υετού ανά

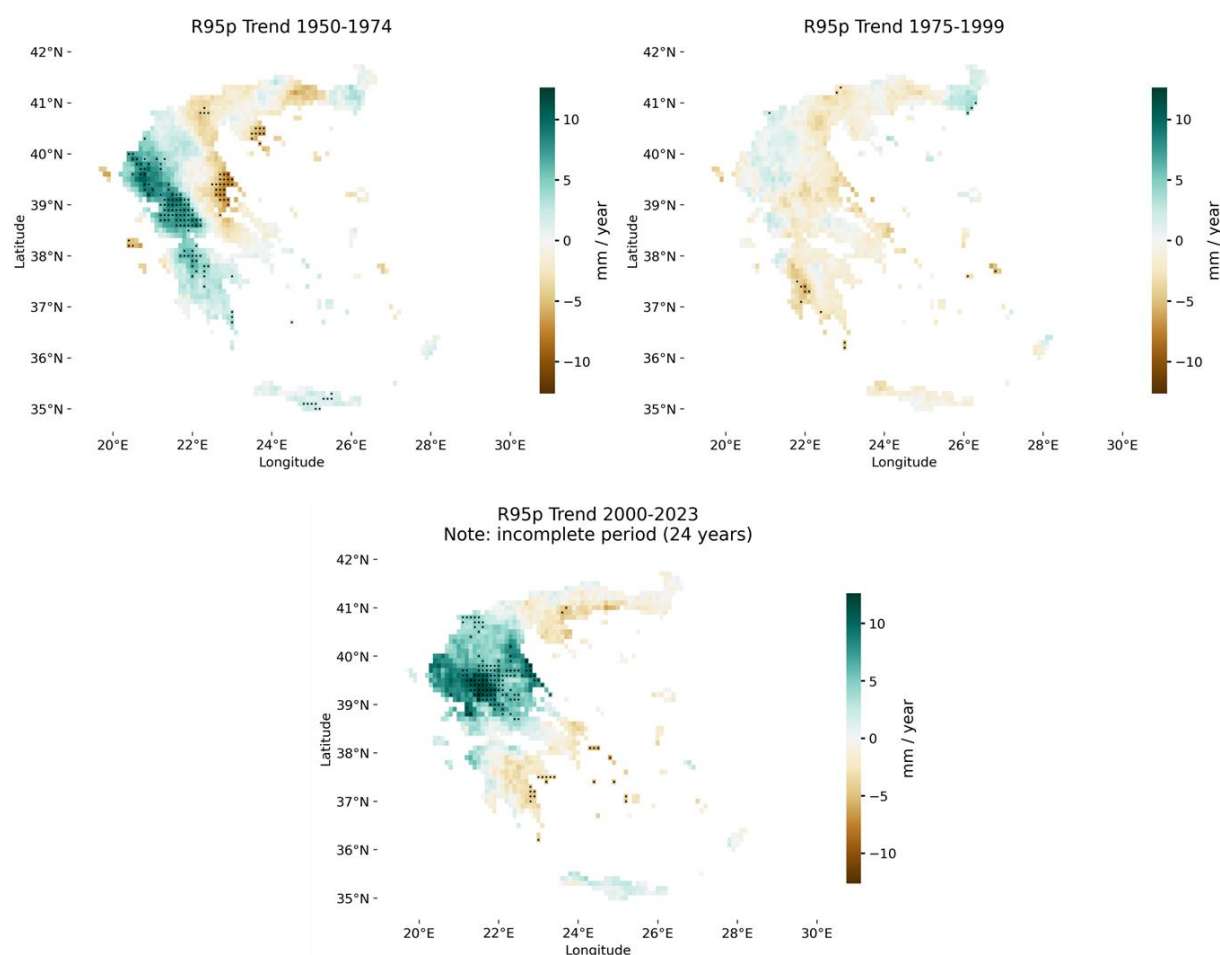
υδρολογικό έτος (δείκτης R95p) η γεωγραφική κατανομή των τάσεων (Σχ. 3.25) δείχνει ότι η μεταβολή δεν παρουσιάζει χωρική ομοιομορφία στον ελλαδικό χώρο. Συγκεκριμένα, ο δείκτης R95p, όπως και ο δείκτης R95pDays, παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές θετικές τάσεις στη δυτική Μακεδονία, και στη δυτική Κρήτη (περίπου 90 mm έως 110 mm όλης της περιόδου), ενώ αρνητικές τάσεις, επίσης στατιστικά σημαντικές έχουν υπολογιστεί για τις περιοχές της Χαλκιδικής, της ανατολικής Μακεδονίας, των νησιών του ανατολικού Αιγαίου και της δυτικής Πελοποννήσου (περίπου -75 mm έως -120 mm όλης της περιόδου). Όπως και με το δείκτη R95pDays, έτσι και με το δείκτη R95p η γεωγραφική κατανομή των τάσεων βρίσκεται σε γενική συμφωνία με τη γεωγραφική κατανομή των τάσεων μεταβολής του ετήσιου (υδρολογικό έτος) αθροιστικού υετού. Ωστόσο, και στην περίπτωση του δείκτη R95p, όπως και στην περίπτωση του δείκτη R95pDays, ενώ αυτός παρουσιάζει θετικές τάσεις στη δυτική Κρήτη, στην ίδια περιοχή οι τάσεις του ετήσιου αθροιστικού υετού είναι αρνητικές. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι η περιοχή της δυτικής Κρήτης στο πέρασμα του χρόνου ενδεχομένως βιώνει όλο και περισσότερο έντονες εναλλαγές μεταξύ ακραίων ξηρασιών και φαινομένων ακραίου υετού. Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται στην έρευνα των Retalis et al. (2026), οι οποίοι με τη χρήση δεδομένων ERA5-Land για την περίοδο 1981-2020 υπολόγισαν σχεδόν μηδενικές τάσεις μεταβολής του ετήσιου (ημερολογιακό έτος) αθροιστικού υετού στη δυτική Κρήτη, αλλά ταυτόχρονα σχετικά υψηλές θετικές τάσεις του συνολικού ετήσιου υετού που έχει προκύψει μόνο από τις ημέρες κατά τις οποίες ο υετός ξεπερνούσε τα 20 mm και του ετήσιου πλήθους ημερών με υετό μεγαλύτερο από 20 mm.



Σχήμα 3.26 Θηκόγραμμα του δείκτη R95p των τιμών ακραίου υετού από το 1950 έως το 2023.

Το θηκόγραμμα του δείκτη R95p ανά 5ετίες αποτυπώνει τη χρονική εξέλιξη της κατανομής του ακραίου υετού. Παρατηρείται ότι κατά τις πρώτες δεκαετίες (1950–1970) οι διάμεσες τιμές βρίσκονται σε σχετικά υψηλότερα επίπεδα, υποδηλώνοντας αυξημένη ένταση των ακραίων επεισοδίων. Στη συνέχεια, κατά την περίοδο 1980–1990 καταγράφεται σαφής μείωση τόσο της διάμεσης τιμής όσο και της διασποράς, γεγονός που δηλώνει μείωση των ακραίων φαινομένων υετού. Από τη δεκαετία του 2000 και έπειτα παρατηρείται εκ νέου αύξηση των διάμεσων τιμών, καθώς και διεύρυνση της διασποράς, γεγονός που υποδηλώνει ενίσχυση της έντασης και μεγαλύτερη μεταβλητότητα των ακραίων επεισοδίων υετού. Επιπλέον, η παρουσία πολλών υψηλών ακραίων τιμών (outliers), ιδιαίτερα στις πιο πρόσφατες περιόδους, υποδηλώνει την εμφάνιση ισχυρών επεισοδίων υετού. Έπειτα, ακολουθούν η ανάλυση σε 25ετίες και 10ετίες για την περαιτέρω διερεύνηση της μεταβλητότητας του ακραίου υετού για τη χρονική περίοδο μελέτης (1950-2023).

3.3.5 Τάσεις του δείκτη R95p ανά 25ετία



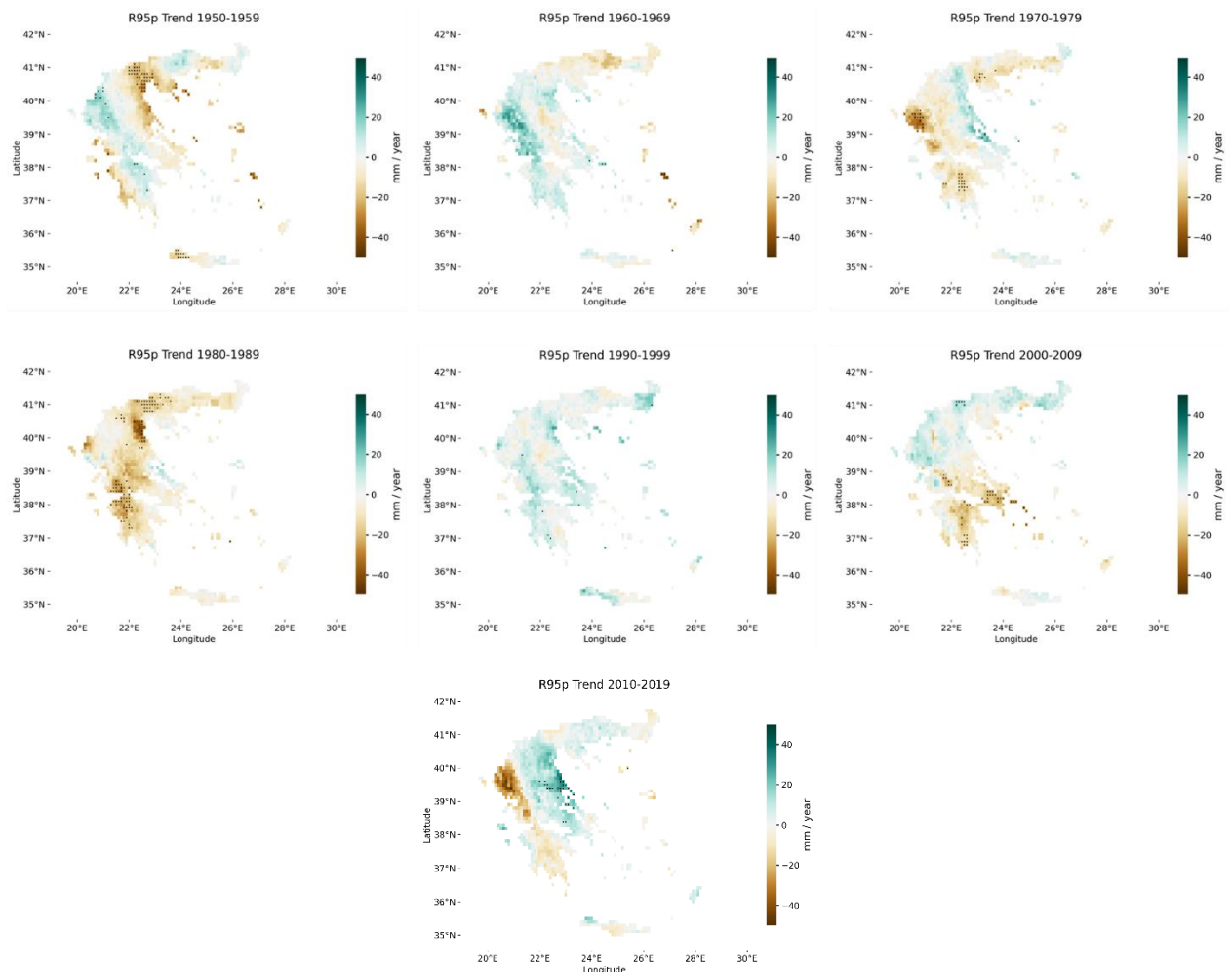
Σχήμα 3.27 Χωρική κατανομή των τάσεων του ετήσιου (υδρολογικό έτος) ακραίου υετού, για τις 25-ετής περιόδους: 1950-1974, 1975-1999, 2000-2023. Στην τελευταία 25-ετία υπολείπεται ένα έτος.

Πίνακας 3.17 Μέγιστες θετικές και αρνητικές τιμές τάσεων του ακραίου υετού ανά 25ετία από το 1950 έως το 2023, υπολείπεται ένα έτος στην τελευταία 25ετία *.

	Maximum Negative Trend (mm/year)	Maximum Positive Trend (mm/year)
1950-1974	-8.19 -204.75 total	10.92 273.00 total
1975-1999	-6.74 -168.50 total	4.36 109.00 total
2000-2023*	-6.57 -157.68 total	12.63 303.12 total

Η γεωγραφική κατανομή των τάσεων μεταβολής του δείκτη R95p ανά 25-ετία (Σχ. 3.27) για κάθε μία από τις τρεις περιόδους (1950-1974, 1975-1999 και 2000-2023), παρουσιάζει το ίδιο χωρικό μοτίβο με αυτό του δείκτη R95pDays, για κάθε αντίστοιχη περίοδο. Η ανάλυση των τάσεων του δείκτη R95p σε επιμέρους χρονικές περιόδους 25ετιών, αναδεικνύει σαφείς διαφοροποιήσεις στην ένταση των ακραίων γεγονότων υετού. Κατά την περίοδο 1950–1974 παρατηρούνται κυρίως θετικές τάσεις, ιδιαίτερα στη δυτική Ελλάδα, με κάποιες αρνητικές τάσεις στη Θεσσαλία και στη νότια Μακεδονία. Αντίθετα, κατά την περίοδο 1975–1999 επικρατούν ασθενείς αρνητικές και θετικές τάσεις στο μεγαλύτερο μέρος της χώρας. Στην πιο πρόσφατη περίοδο (2000–2023) παρατηρείται εκ νέου ενίσχυση της έντασης των ακραίων γεγονότων υετού, κυρίως στη κεντρική και δυτική αλλά και μέρος της βόρειας Ελλάδας, με έντονες θετικές τάσεις που σε αρκετές περιπτώσεις είναι στατιστικά σημαντικές. Η εικόνα αυτή υποδηλώνει μία φάση ανάκαμψης ή και ενίσχυσης του ακραίου υετού.

3.3.6 Τάσεις του δείκτη R95p ανά 10ετία

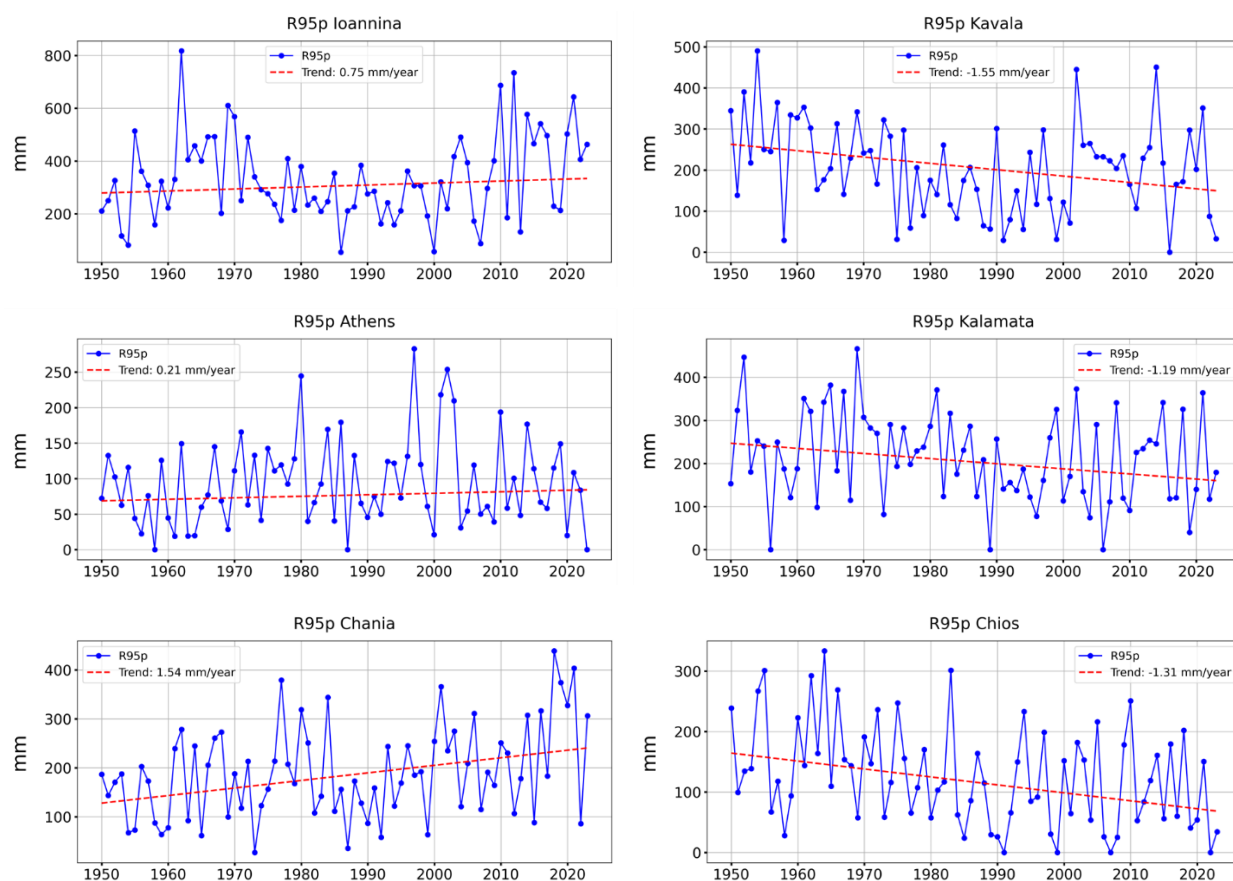


Σχήμα 3.28 Χωρική κατανομή των τάσεων του ετήσιου (υδρολογικό έτος) ακραίου νετού, για τις 10-ετής περιόδους: 1950-1959, 1960-1969, 1970-1979, 1980-1989, 1990-1999, 2000-2009, 2010-2019.

Πίνακας 3.18 Μέγιστες αρνητικές και θετικές τιμές τάσεων του ακραίου νετού ανά 10ετία από το 1950 έως το 2019.

	Maximum Negative Trend (mm/year)	Maximum Positive Trend (mm/year)
1950-1959	-34.89	21.12
1960-1969	-39.54	32.21
1970-1979	-38.96	26.40
1980-1989	-43.86	16.36
1990-1999	-11.83	28.14
2000-2009	-30.30	21.21
2010-2019	-49.77	40.69

Η δεκαετής ανάλυση των τάσεων του δείκτη R95p αναδεικνύει με σαφήνεια τη χρονική μεταβλητότητα της έντασης των ακραίων γεγονότων υετού. Κατά τις δεκαετίες του 1950 και 1960 παρατηρούνται κυρίως θετικές τάσεις, ιδιαίτερα στη δυτική Ελλάδα, υποδηλώνοντας αυξημένα ακραίο υετό. Η δεκαετία του 1970 εμφανίζει μεταβατική συμπεριφορά, με εξασθένηση των θετικών τάσεων και εμφάνιση τοπικών αρνητικών μεταβολών με πιο έντονες αρνητικές τάσεις στα δυτικά. Η δεκαετία του 1980 ξεχωρίζει ως περίοδος έντονης μείωσης του ακραίου υετού, με εκτεταμένες αρνητικές τάσεις στο μεγαλύτερο μέρος της χώρας. Στη συνέχεια, κατά τη δεκαετία του 1990 παρατηρείται σταδιακή επαναφορά, ενώ η δεκαετία του 2000 χαρακτηρίζεται από θετικές τάσεις του ακραίου υετού κυρίως στη δυτική και βόρεια Ελλάδα με παρουσία αρνητικών τάσεων στη κεντρική και νότια Ελλάδα. Η δεκαετία του 2010 παρουσιάζει μικτή εικόνα, με αύξηση στα ανατολικά της Πίνδου και μείωση στα βορειοδυτικά, υποδηλώνοντας αυξημένη χωρική μεταβλητότητα.



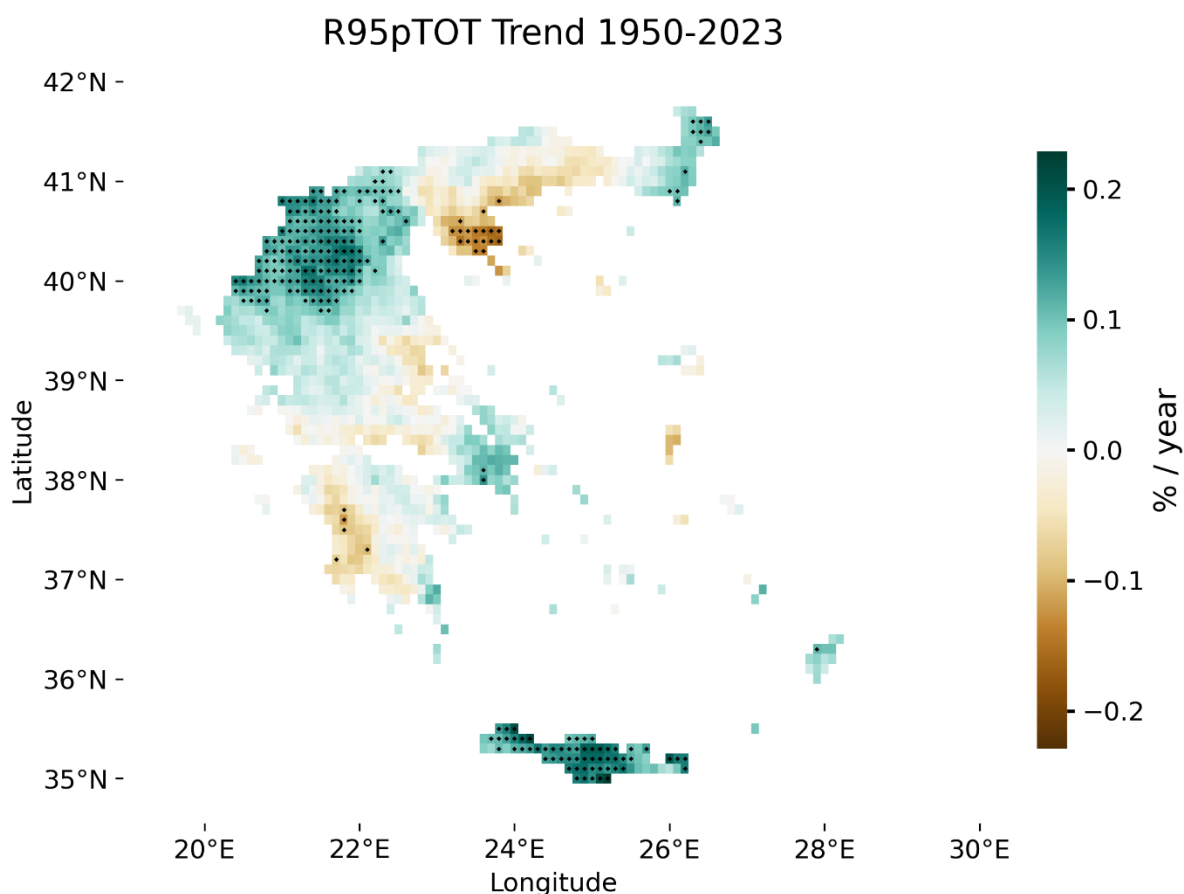
Σχήμα 3.29 Χρονική εξέλιξη αντιπροσωπευτικών σημείων του δείκτη R95p για περιοχές με θετικές και αρνητικές τάσεις.

Για την πληρέστερη κατανόηση της χρονικής εξέλιξης του ακραίου υετού, επιλέχθηκαν αντιπροσωπευτικά πλεγματικά σημεία από διαφορετικές περιοχές της Ελλάδας και παρουσιάστηκαν οι αντίστοιχες χρονοσειρές του δείκτη R95p. Η ανάλυση αυτή επιτρέπει την πιο άμεση αποτύπωση των μεταβολών του ακραίου υετού σε τοπική κλίμακα. Τα

αποτελέσματα αναδεικνύουν σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των περιοχών. Στα Ιωάννινα και ιδιαίτερα στα Χανιά παρατηρείται θετική τάση, υποδηλώνοντας αύξηση του ακραίου υετού, γεγονός που είναι συνεπές με τα ευρήματα της χωρικής ανάλυσης για τη δυτική Ελλάδα. Η Αθήνα παρουσιάζει ασθενή θετική τάση, με σημαντική διαχρονική μεταβλητότητα, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι μεταβολές στην ένταση των ακραίων φαινομένων στην περιοχή αυτή είναι λιγότερο σαφείς (οι θετικές αυτές τάσεις δεν χαρακτηρίζονται από στατιστική σημαντικότητα, ωστόσο τα Ιωάννινα και τα Χανιά είναι πλησίον σε περιοχές με στατιστική σημαντικότητα, Σχήμα 3.25). Αντίθετα, στην Καβάλα, την Καλαμάτα και ιδιαίτερα στη Χίο (χαρακτηρίζονται από στατιστική σημαντικότητα και οι τρεις περιοχές, Σχήμα 3.25) καταγράφονται αρνητικές τάσεις, υποδηλώνοντας μείωση του ακραίου υετού. Συνολικά, οι χρονοσειρές επιβεβαιώνουν τη χωρική ανομοιογένεια των τάσεων που παρατηρείται στους χάρτες, ενώ αναδεικνύουν και την έντονη διαχρονική μεταβλητότητα των ακραίων γεγονότων υετού. Η ύπαρξη ισχυρών διακυμάνσεων στις χρονοσειρές υποδηλώνει ότι τα ακραία γεγονότα υετού χαρακτηρίζονται από υψηλή μεταβλητότητα και ενδέχεται να επηρεάζονται έντονα από μεμονωμένα επεισόδια μεγάλης έντασης.

3.3.7 Τάσεις του δείκτη R95pTOT για όλη τη χρονική περίοδο (1950-2023)

Στην παρούσα ενότητα αναλύονται οι τάσεις του δείκτη R95pTOT, ο οποίος εκφράζει τη συμβολή των ακραίων φαινομένων στο συνολικό ετήσιο ύψος του υετού και σε συνδυασμό με τους άλλους δύο δείκτες παρέχουν μια ολοκληρωμένη εικόνα της διαχρονικής μεταβολής των επεισοδίων ακραίου υετού στη χώρα.



Σχήμα 3.30 Χωρική κατανομή των τάσεων του δείκτη R95pTOT της συμβολής των επεισοδίων ακραίου νετού στο συνολικό ετήσιο ύψος, κατά την περίοδο 1950 - 2023.

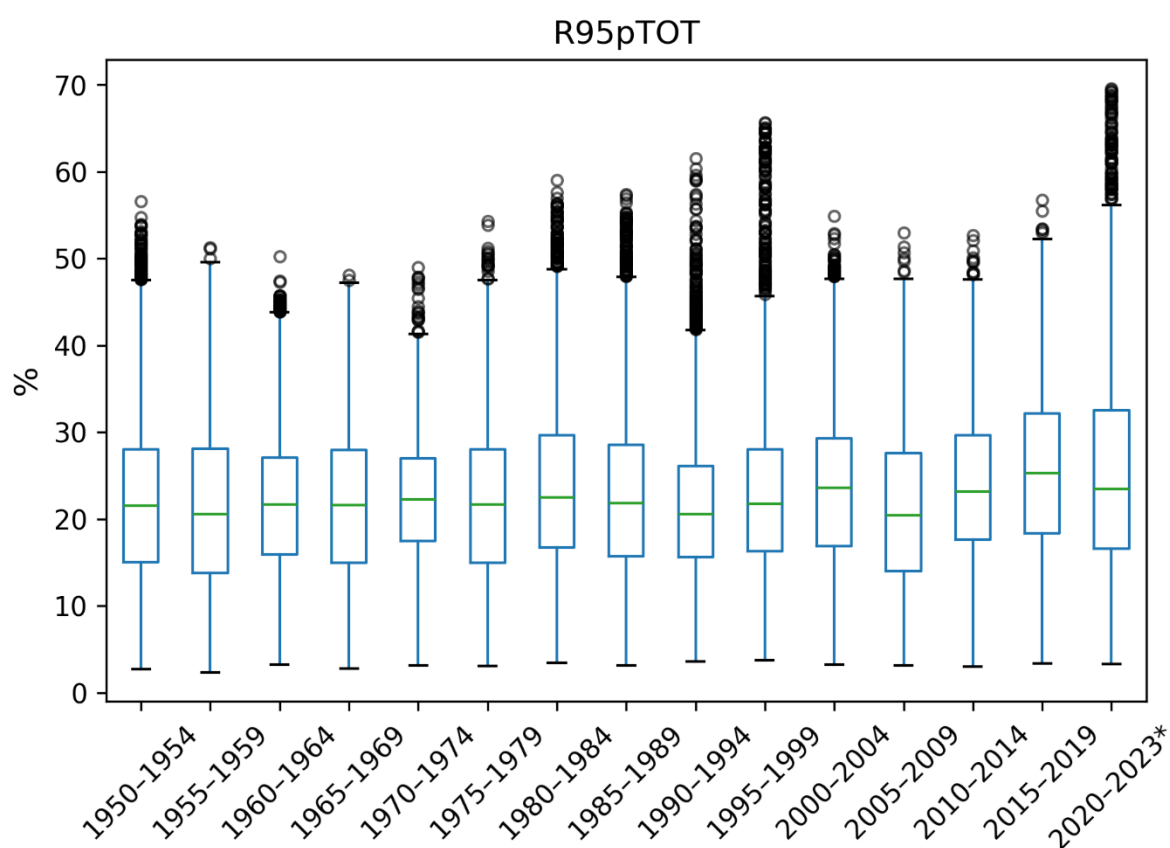
Πίνακας 3.19 Μέγιστες αρνητικές και θετικές τιμές τάσεων συμβολής ακραίου νετού στον συνολικό νετό, από το 1950 έως το 2023.

	Maximum Negative Trend (%/year)	Maximum Positive Trend (%/year)
1950-2023	-0.16	0.22
	-11.84 total	16.28 total

Η γεωγραφική κατανομή των τάσεων του δείκτη R95pTOT για όλη τη χρονική περίοδο μελέτης (1950–2023) (Σχήμα 3.30), παρουσιάζει κοινά χαρακτηριστικά με τις χωρικές κατανομές των δύο άλλων δεικτών και ιδιαίτερα του δείκτη του δείκτη R95p, με την οποία είναι σχεδόν ταυτόσημες. Η ομοιότητα αυτή είναι αναμενόμενη καθώς πρόκειται για χαρακτηριστικά των ίδιων επεισοδίων. Θετικές τάσεις, που υποδηλώνουν αύξηση του ποσοστού του συνολικού νετού που οφείλεται σε ακραία γεγονότα, εντοπίζονται κυρίως στη δυτική και βορειοδυτική Ελλάδα, στην ανατολική Θράκη, στην Αττική, την Εύβοια και την ανατολική Πελοπόννησο, στο νότιο Αιγαίο και μάλιστα σε ολόκληρη την Κρήτη

Πελοποννήσου (περίπου 5% έως 16% όλης της περιόδου). Σε αρκετές από αυτές τις περιοχές οι τάσεις βρέθηκαν να είναι στατιστικά σημαντικές. Αντίθετα, αρνητικές τάσεις παρατηρούνται κυρίως σε περιοχές της κεντρικής Μακεδονίας και ιδιαίτερα στη χερσόνησο της Χαλκιδικής όπου είναι και στατιστικά σημαντικές, και στη δυτική Πελοπόννησο, υποδηλώνοντας μείωση της σχετικής συμβολής των ακραίων φαινομένων στο συνολικό υετό Πελοποννήσου (περίπου -5% έως -11% όλης της περιόδου). Η χωρική αυτή διαφοροποίηση επιβεβαιώνει ότι η μεταβολή της συμβολής των ακραίων φαινομένων στον συνολικό ετήσιο υετό, δεν είναι ομοιόμορφη, αλλά παρουσιάζει έντονη τοπική εξάρτηση.

Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι στις περιοχές όπου καταγράφηκαν στατιστικά σημαντικές θετικές τάσεις τα ακραία φαινόμενα υετού συμβάλλουν ολοένα και περισσότερο στο συνολικό υετό, γεγονός που υποδηλώνει αύξηση της σημασίας των έντονων επεισοδίων στο καθεστώς υετού και στο υδρολογικό ισοζύγιο της περιοχής.

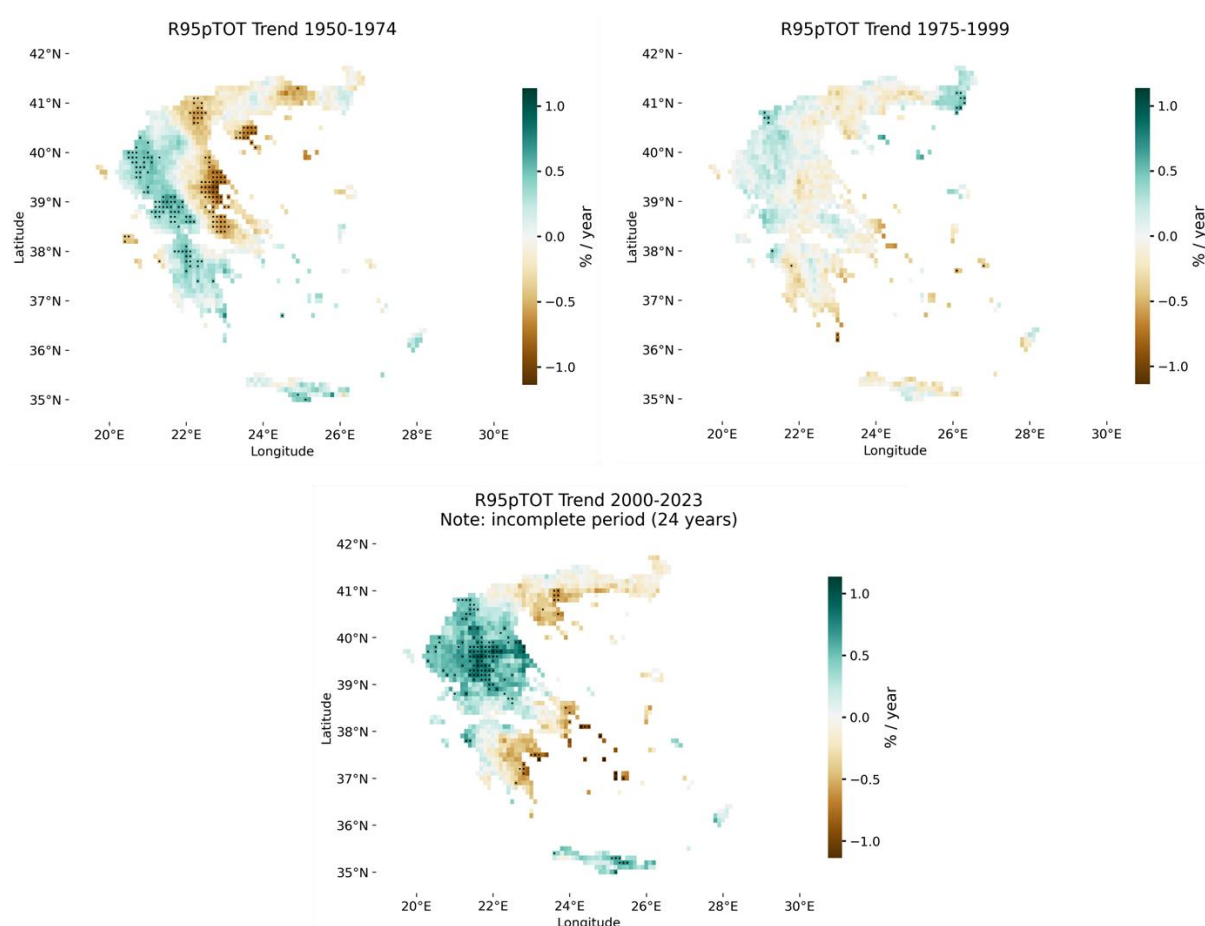


Σχήμα 3.31 Θηκόγραμμα του δείκτη R95pTOT της συμβολής ακραίου υετού στο συνολικό υετό, από το 1950 έως το 2023.

Το θηκόγραμμα του δείκτη R95pTOT (Σχήμα 3.31) αποτυπώνει τη χρονική εξέλιξη της κατανομής της συμβολής των ακραίων γεγονότων υετού στο συνολικό υετό. Παρατηρείται ότι κατά τις πρώτες δεκαετίες (1950–1970) οι διάμεσες τιμές κυμαίνονται σε σχετικά σταθερά επίπεδα, υποδηλώνοντας σταθερή συμμετοχή των ακραίων γεγονότων στο καθεστώς υετού. Κατά την περίοδο 1980–1995 καταγράφεται μικρή μείωση ή σταθεροποίηση της διάμεσης

τιμής με αρκετά όμως outliers που υποδηλώνουν πως υπήρξαν αρκετά γεγονότα ακραίου υετού εκείνη την περίοδο κατά τα οποία ο ακραίος υετός έπαιξε σημαντικό ρόλο στο συνολικό αποτύπωμα του υετού. Αντίθετα, από την πενταετία του 1995-2000 και έπειτα παρατηρείται αύξηση των διάμεσων τιμών, γεγονός που υποδηλώνει ενίσχυση της συμβολής των ακραίων γεγονότων. Επιπλέον, η παρουσία αυξημένου αριθμού υψηλών τιμών (outliers) στην πιο πρόσφατη περίοδο υποδηλώνει ότι σε ορισμένες περιπτώσεις τα ακραία γεγονότα συνεισφέρουν ιδιαίτερα μεγάλο ποσοστό στο συνολικό υετό. Ακολουθεί η ανάλυση της συμβολής του ακραίου υετού στον συνολικό υετό σε 25ετή και 10ετή ανάλυση.

3.3.8 Τάσεις του δείκτη R95pTOT ανά 25ετία



Σχήμα 3.32 Απεικόνιση τάσεων συμβολής του ακραίου υετού στον συνολικό υετό, ανά 25ετία, από το 1950 έως το 2023: 1950-1974, 1975-1999, 2000-2023.

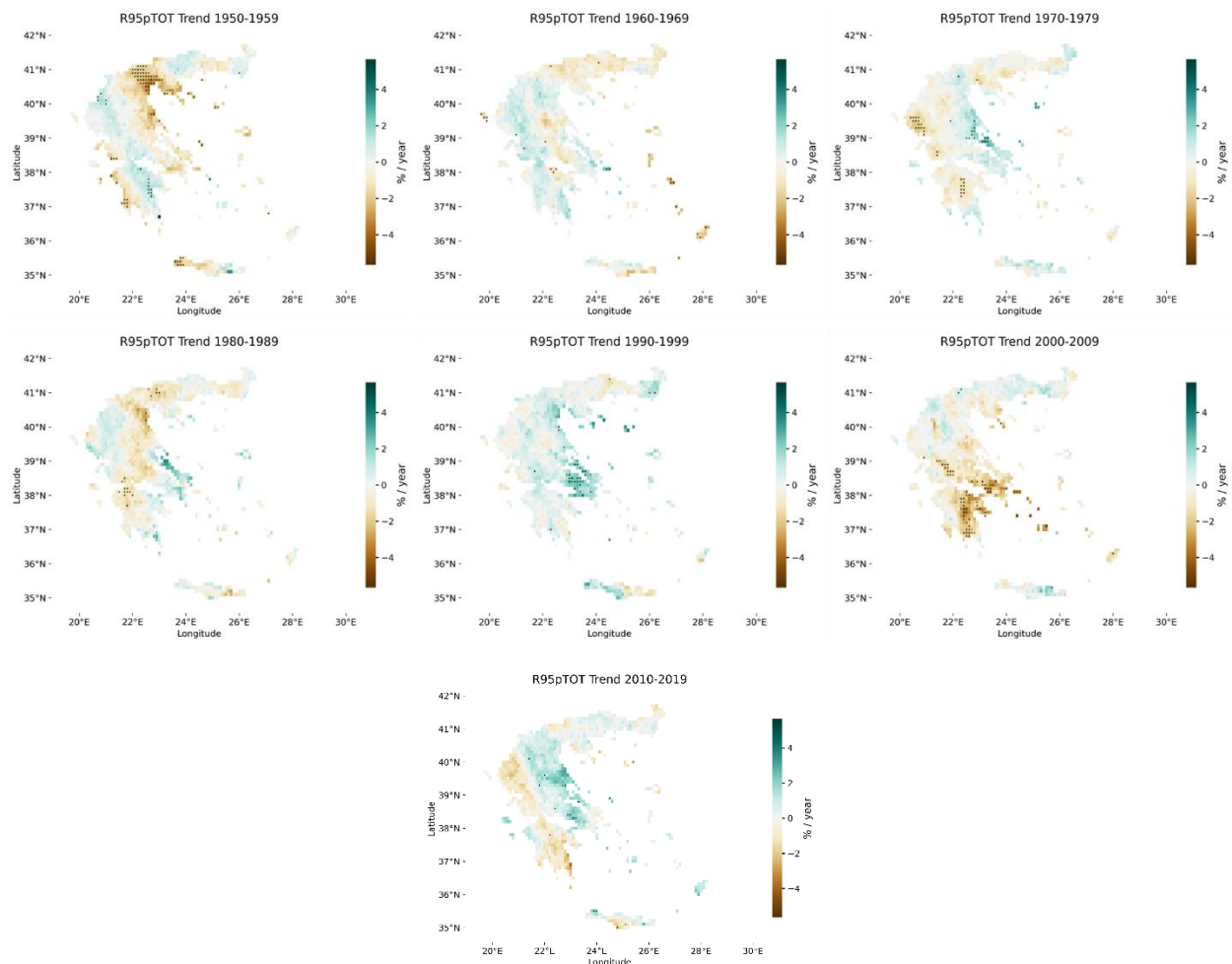
Πίνακας 3.20 Μέγιστες θετικές και αρνητικές τιμές τάσεων συμβολής ακραίου υετού στον συνολικό υετό, ανά 25ετία, από το 1950 έως το 2023, υπολείπεται ένα έτος στην τελευταία 25ετία *.

	Maximum Negative Trend (%/year)	Maximum Positive Trend (%/year)
1950-1974	-0.96 -24.00 total	0.75 18.75 total
1975-1999	-0.80 -20.00 total	0.68 17.00 total
2000-2023*	-1.13 -27.12 total	1.07 25.68 total

Η χωρική κατανομή των τάσεων του δείκτη R95pTOT ανά 25-ετία, 1950-1974, 1975-1999, 2000-2023, παρουσιάζει την ίδια εικόνα με αυτή των άλλων δύο δεικτών (Σχήμα 3.32). Κατά την πρώτη περίοδο (1950-1975) με εξαίρεση τα νησιά του Ιονίου, καταγράφονται θετικές τάσεις αύξησης στη δυτική Ελλάδα, οι οποίες σε αρκετές περιοχές είναι στατιστικά σημαντικές. Να σημειωθεί ότι αυτή την 25-ετία στη συγκεκριμένη περιοχή εμφάνισε σημαντική τάση αύξησης και ο ετήσιος υετός (Σχήμα 3.12). Θετικές τάσεις εμφανίζονται επίσης στο νότιο και νοτιοανατολικό Αιγαίο. Ωστόσο, αρνητικές τάσεις εμφανίζονται στα ανατολικά της ηπειρωτικής χώρας, την κεντρική και ανατολική Μακεδονία και Θράκη παρότι τη συγκεκριμένη 25-ετία ο ετήσιος υετός εμφανίζει θετικές τάσεις ή ασθενείς αρνητικές. Αξίζει να αναφερθεί η περίπτωση νησιών του νοτιοανατολικού Αιγαίου (π.χ. Ρόδος) όπου ο συνολικός υετός εμφανίζει τάση μείωσης αλλά η συμβολή των επεισοδίων ακραίου υετού σε αυτή φαίνεται να αυξάνει.

Κατά την περίοδο 1975–1999, η οποία έχει ταυτοποιηθεί ως η πιο ξηρή 25-ετία της περιόδου μελέτης (Σχήμα 3.12), οι εκτιμώμενες τάσεις, θετικές και αρνητικές είναι γενικά ασθενείς, με τις πρώτες να σημειώνονται στη δυτική-βορειοδυτική Ελλάδα και στην ανατολική Θράκη και τα νησιά του βορειοανατολικού Αιγαίου με έως μέτριες αρνητικές και θετικές τάσεις σε μεγάλο μέρος της χώρας. Συνεπώς κατά τη συγκεκριμένη περίοδο η γενικευμένη μείωση του ετήσιου υετού συνοδεύεται και από εξασθένηση της συχνότητας και της έντασης των συμβάντων ακραίων υετού. Θα πρέπει όμως να υπογραμμιστεί, η στατιστικά σημαντική συμβολή των ακραίων επεισοδίων στον συνολικό υετό στην δυτική Μακεδονία και την ανατολική Θράκη. Στην πιο πρόσφατη περίοδο (2000–2023), παρατηρείται εκ νέου ενίσχυση της συμβολής των ακραίων γεγονότων στα κεντρικά, δυτικά και βορειοδυτικά της χώρας, στη Θεσσαλία και την Κρήτη, ενώ στην κεντρική και δυτική Μακεδονία, τη Θράκη, την ανατολική Στερεά Ελλάδα, ανατολική Πελοπόννησο και στις Κυκλάδες παρατηρούνται τάσεις μείωσης. Με εξαίρεση την Κρήτη και τα Δωδεκάνησα, το μοτίβο της χωρικής κατανομής του δείκτη R95pTOT προσομοιάζει σημαντικά το αντίστοιχο μοτίβο του ετήσιου υετού (Σχήμα 3.12).

3.3.9 Τάσεις του δείκτη R95pTOT ανά 10ετία

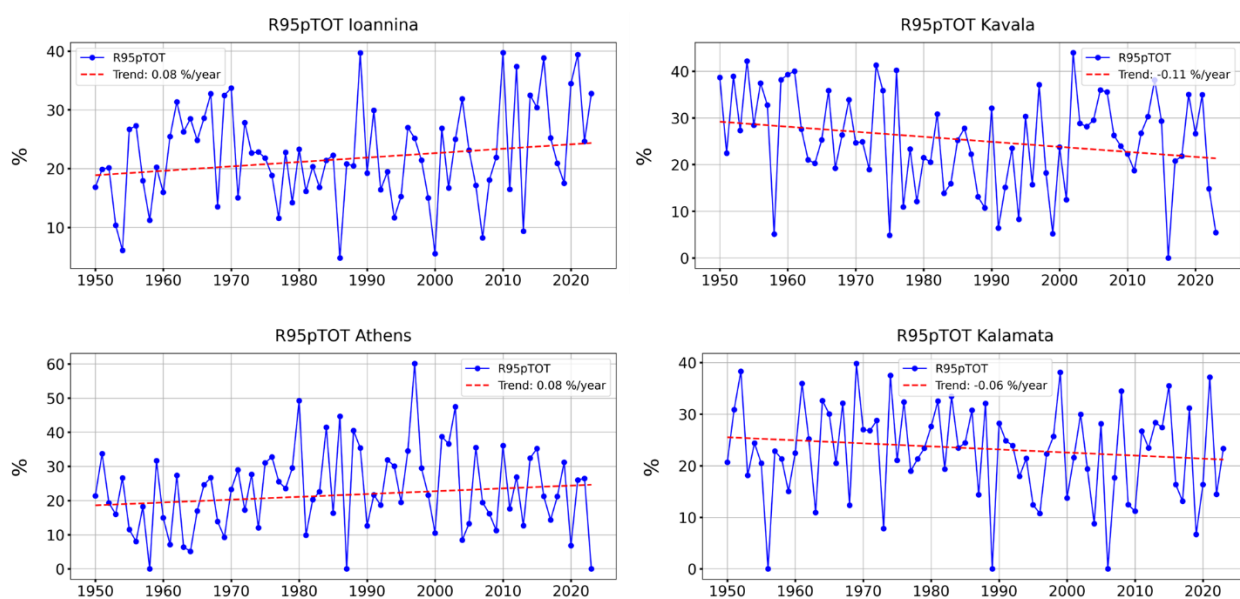


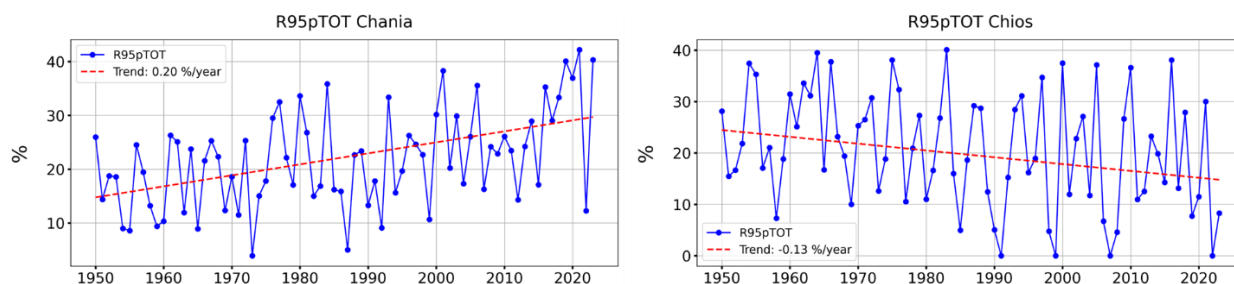
Σχήμα 3.33 Χωρική κατανομή των τάσεων του δείκτη R95pTOT της συμβολής του νετού των ακραίων επεισοδίων στο συνολικό ύψος νετού, ανά 10ετία της περιόδου 1950 – 2019: 1950-1959, 1960-1969, 1970-1979, 1980-1989, 1990-1999, 2000-2009, 2010-2019.

Πίνακας 3.21 Μέγιστες αρνητικές και θετικές τιμές τάσεων συμβολής ακραίου νετού στον συνολικό νετό, ανά 10ετία, από το 1950 έως το 2019.

	Maximum Negative Trend (%/year)	Maximum Positive Trend (%/year)
1950-1959	-3.77	5.65
1960-1969	-3.12	2.91
1970-1979	-2.21	3.16
1980-1989	-3.05	3.66
1990-1999	-2.24	3.92
2000-2009	-3.90	2.52
2010-2019	-3.97	3.15

Τα χωρικά πρότυπα που αναδεικνύονται από τη χωρική κατανομή των τάσεων του δείκτη R95pTOT σε αρκετές περιπτώσεις (δεκαετίες) προσομοιάζουν με τα αντίστοιχα των δύο άλλων δεικτών, όπως και σε ορισμένες περιπτώσεις καθορίζονται σημαντικά από τις αντίστοιχες κατανομές των τάσεων του ετήσιου υετού (Σχήμα 3.13). Ωστόσο, τη δεκαετία του 1960 που έχει χαρακτηριστεί ως η πιο υγρή δεκαετία της περιόδου μελέτης με τον ετήσιο υετό να εμφανίζει θετικές τάσεις σε όλη τη χώρα, οι τάσεις των τριών δεικτών που είναι πανομοιότυπες μεταξύ τους, ακολουθούν τις αυξητικές τάσεις κυρίως στη δυτική Ελλάδα, ενώ στα ανατολικά και νότια χαρακτηρίζονται από αρνητικές τάσεις. Αντίστοιχα, τη δεκαετία του 1970 που χαρακτηρίζεται από γενική, αλλά όχι σημαντική, τάση μείωσης του υετού, οι τρεις δείκτες παρουσιάζουν θετικές τάσεις κατά μήκος της ανατολικής ηπειρωτικής χώρας. Τη δεκαετία του '80 που αποτελεί το πιο ξηρό διάστημα της περιόδου μελέτης με σημαντικές τάσεις μείωσης του υετού σε ολόκληρη τη χώρα. Ενώ ο δείκτης της συχνότητας εμφάνισης ακραίων φαινομένων ακολουθεί αυτή την κατανομή με αρνητικές ή μηδενικές τάσεις σε όλη την επικράτεια, ο δείκτης R95p (του συνολικού ακραίου υετού) και R95pTOT (το ποσοστό συνολικού ακραίου υετού που οφείλεται σε ακραία επεισόδια) όμως εμφανίζουν θετικές τάσεις κυρίως στην ανατολική στερεά Ελλάδα, περιοχές της Θεσσαλίας και της Πελοποννήσου αλλά και της βορειοδυτικής Ελλάδας, παρά τη μείωση του ετήσιου υετού. Κατά τη δεκαετία του 1990 αρχίζει η τάση ανάκαμψης του ετήσιου υετού στις περισσότερες περιοχές της χώρας (κυρίως στα δυτικά και τα ανατολικά). Την πρώτη δεκαετία του 2000, ενώ η τάση αύξησης του ετήσιου υετού έχει εδραιωθεί στο μεγαλύτερο μέρος της ηπειρωτικής χώρας συνοδευόμενη από αυξημένο αριθμό ημερών ακραίου υετού, η ένταση των επεισοδίων και η συμβολή αυτών στο συνολικό ποσό δεν ακολουθεί αυτό το χωρικό πρότυπο. Κατά την τελευταία δεκαετία της περιόδου μελέτης, οι τάσεις των δεικτών των ακραίων επεισοδίων ακολουθούν σε σημαντικό βαθμό τη γενική τάση με αρνητικές τιμές στη δυτική Ελλάδα και θετικές τιμές στην ανατολική ηπειρωτική Ελλάδα.





Σχήμα 3.34 Χρονική εξέλιξη αντιπροσωπευτικών σημείων του δείκτη $R95pTOT$ για περιοχές με θετικές και αρνητικές τάσεις.

Για την διερεύνηση της διαχρονικής μεταβολής της συμβολής των ακραίων φαινομένων υετού στο συνολικό ετήσιο ύψος, παρουσιάζονται χρονοσειρές του δείκτη $R95pTOT$ για επιλεγμένα αντιπροσωπευτικά πλεγματικά σημεία του ελλαδικού χώρου (Σχήμα 3.34). Η ανάλυση αυτή επιτρέπει την πιο άμεση κατανόηση των μεταβολών στη συμμετοχή των ακραίων γεγονότων στο συνολικό υετό. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν σαφείς διαφοροποιήσεις μεταξύ των περιοχών. Στα Ιωάννινα, την Αθήνα και ιδιαίτερα στα Χανιά (τα Ιωάννινα και η Αθήνα δεν χαρακτηρίζονται από στατιστική σημαντικότητα, έχουν πλησίον τους όμως πλεγματικά σημεία θετικών τάσεων όπου χαρακτηρίζονται από στατιστική σημαντικότητα, με τα Χανιά να χαρακτηρίζονται στην ανάλυση αυτού του δείκτη από σημαντικότητα, Σχήμα 3.30), παρατηρείται έντονη θετική τάση, υποδηλώνοντας αύξηση του ποσοστού του συνολικού υετού που προέρχεται από ακραία επεισόδια. Αντίθετα, στην Καβάλα, την Καλαμάτα και τη Χίο (δεν χαρακτηρίζονται από στατιστική σημαντικότητα οι τρεις περιοχές) καταγράφονται αρνητικές τάσεις, υποδηλώνοντας μείωση της συμβολής των ακραίων γεγονότων. Επιπλέον, όλες οι χρονοσειρές χαρακτηρίζονται από έντονη διαχρονική μεταβλητότητα.

Συνολικά, η ανάλυση των δεικτών επεισοδίων ακραίου υετού ($R95pDays$, $R95p$ και $R95pTOT$) αναδεικνύει ότι ο υετός στον ελλαδικό χώρο δεν μεταβάλλεται μόνο ως προς τη συνολική ποσότητα (ετήσιο ύψος), αλλά και ως προς τη δομή του. Οι πρόσφατες δεκαετίες χαρακτηρίζονται από αύξηση τόσο της συχνότητας όσο και της έντασης των ακραίων γεγονότων και συνεπακόλουθα από ενίσχυση της σχετικής συμβολής τους στο συνολικό υετό. Υπάρχουν όμως και περιοχές με αντίθετη τάση, δηλαδή με μείωση ακραίου υετού. Αυτή η χωρική ετερογένεια των τάσεων, σε συνδυασμό με το ότι εντοπιστήκαν και περιοχές που παραμένουν σχετικά ουδέτερες (με μηδενικές τάσεις), αναδεικνύουν την τοπικότητα που χαρακτηρίζει τον ακραίο υετό.

Διάφορες μελέτες έχουν διαπιστώσει αύξηση της συχνότητας εμφάνισης και της έντασης ακραίων φαινομένων υετού. Παράδειγμα η ερευνητική εργασία του Zittis (2017) χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικές βάσεις δεδομένων διαπίστωσε πως στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου κατά την περίοδο 1988-2014, η μεγαλύτερη αύξηση στην ετήσια συχνότητα εμφάνισης και στην ένταση φαινομένων ακραίου υετού ($> 20 \text{ mm}$) καταγράφηκε στη Βαλκανική χερσόνησο και στην Ανατολία. Αντίστοιχα, στην ανάλυση των Retalis et al. (2026) για τον ελλαδικό χώρο, η χρήση δεδομένων ERA5-Land αποκάλυψε συνολική θετική

τάση αύξησης της έντασης του ακραίου νετού ($> 20 \text{ mm}$) κατά την περίοδο 1981-2020 ενώ τα δεδομένα E-OBS δεν έδειξαν σαφή και ξεκάθαρη τάση στις περισσότερες περιοχές της χώρας.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η χωρική και χρονική μεταβολή του υετού στον ελλαδικό χώρο για την περίοδο 1950–2024 σε υδρολογική βάση, αξιοποιώντας δεδομένα επανανάλυσης ERA5-Land. Η επιλογή της συγκεκριμένης βάσης δεδομένων έγινε επειδή τα δεδομένα δίνονται σε σημεία πλέγματος, παρέχοντας πλήρη χωρική κάλυψη στο χερσαίο τμήμα της περιοχής μελέτης με υψηλή χωρική ανάλυση ($0.1^\circ \times 0.1^\circ$, περίπου 9 km) και παράλληλα διασφαλίζουν σημαντική χρονική κάλυψη (1950 – σήμερα) με επίσης υψηλή ανάλυση (ωριαία). Η μελέτη περιλάμβανε την αναγνώριση των κυρίαρχων χωρικών προτύπων μέσω παραγοντικής ανάλυσης με σκοπό τη διερεύνηση της διαχρονικής μεταβλητότητας του υετού, έπειτα την χωρική ανάλυση του υετού και των τάσεων του σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες (ετήσια, 25ετής, 10ετής, εποχική και μηνιαία), καθώς και την ανάλυση των ακραίων τιμών υετού μέσω κατάλληλων δεικτών. Η συνδυαστική εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων επέτρεψε την ολοκληρωμένη αποτύπωση της διαχρονικής εξέλιξης του καθεστώτος υετού στην Ελλάδα και την ανάδειξη των κυριότερων χωρικών και χρονικών χαρακτηριστικών του. Προηγήθηκε αξιολόγηση των δεδομένων επανανάλυσης ERA5-Land που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία, με μετρήσεις από τέσσερις μετεωρολογικούς σταθμούς. Τα αποτελέσματα έδειξαν υψηλή συσχέτιση και πολύ καλή αναπαραγωγή της διαχρονικής μεταβλητότητας του υετού, επισημαίνοντας μία υπερεκτίμηση των συνολικών ποσοτήτων, κυρίως στις περιοχές με μεγαλύτερα ύψη υετού.

Η χωρική ανάλυση επιβεβαίωσε την έντονη χωρική ανομοιογένεια του υετού στην Ελλάδα, με τις μεγαλύτερες ποσότητες να καταγράφονται στη δυτική χώρα και ιδιαίτερα στην ομβροπλευρά της οροσειράς της Πίνδου, ενώ οι χαμηλότερες τιμές εμφανίζονται στα ανατολικά ηπειρωτικά (ομβροσκιά της οροσειράς της Πίνδου), στην Αττική, την ανατολική Πελοπόννησο, στο κεντρικό Αιγαίο (Κυκλάδες) και την ανατολική Κρήτη. Παράλληλα, αναδείχθηκε η έντονη εποχικότητα του υετού στην Ελλάδα, καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό του ετήσιου ύψους καταγράφεται κατά τη χειμερινή περίοδο με τον Δεκέμβριο να χαρακτηρίζεται ως ο πιο υγρός μήνας, ενώ η θερινή χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα περιορισμένες ποσότητες υετού.

Η παραγοντική ανάλυση ανέδειξε τέσσερις κύριους τύπους διαχρονικής διακύμανσης του υετού, οι οποίοι εξηγούν συνολικά το 83.32% της συνολικής διακύμανσης. Η ανάλυση των factor scores ανέδειξε κοινή χρονική συμπεριφορά μεταξύ των περισσότερων παραγόντων, με περίοδο μείωσης του υετού κατά τη δεκαετία του 1980 με τάση ανάκαμψης από τα τέλη της δεκαετίας του 1990. Παράλληλα, η ανάλυση των σημείων καμπής επιβεβαίωσε ότι η εξέλιξη του υετού στην Ελλάδα δεν είναι γραμμική, αλλά χαρακτηρίζεται από διακριτές φάσεις αύξησης, μείωσης και εκ νέου αύξησης, με κύρια σημεία μεταβολής γύρω από τις δεκαετίες του 1970 και του 1990.

Η ανάλυση των τάσεων ανέδειξε ότι η εξέλιξη του υετού στον ελλαδικό χώρο χαρακτηρίζεται από έντονη χρονική μεταβλητότητα και μη γραμμική συμπεριφορά. Για το σύνολο της περιόδου επικρατούν γενικά ασθενείς έως και πιο έντονες αρνητικές τάσεις με τιμές μείωσης που κυμαίνονται από τα 140 – 280 mm για το σύνολο της περιόδου μελέτης με

τιμές που φθάνουν έως και τα – 360 mm για όλη τη χρονική περίοδο, κυρίως στη δυτική και νοτιο-δυτική Ελλάδα, στα δυτικά της Κρήτης, τα Ιόνια νησιά καθώς και στην ανατολική Μακεδονία, Θράκη και νησιά του Αιγαίου. Η εξέταση των υποπεριόδων αποκάλυψε διαδοχικές φάσεις αύξησης και μείωσης του υετού. Ιδιαίτερα χαρακτηριστική είναι η δεκαετία του 1980, κατά την οποία παρατηρείται η εντονότερη μείωση του υετού σε μεγάλο μέρος της χώρας, ενώ από τη δεκαετία του 1990 και κυρίως μετά το 2000 διαπιστώνεται τάση μερικής ανάκαμψης σε αρκετές περιοχές, κυρίως στη Θεσσαλία, την Ήπειρο και τη Δυτική Μακεδονία. Η εποχική και μηνιαία ανάλυση έδειξε ότι η συνολική μεταβολή του ετήσιου υετού δεν προέρχεται από όλες τις εποχές στον ίδιο βαθμό. Οι σημαντικότερες αρνητικές τάσεις εντοπίζονται κατά τη χειμερινή περίοδο, η οποία αποτελεί και την κύρια περίοδο υετού της χώρας, ενώ κατά τη θερινή περίοδο παρατηρούνται κυρίως ασθενείς έως και μέτρια θετικές τάσεις κατά τόπους. Η μηνιαία ανάλυση ανέδειξε ακόμη μεγαλύτερη πολυπλοκότητα, καθώς μήνες της ίδιας εποχής παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά, γεγονός που υπογραμμίζει την αξία της ανάλυσης σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες.

Η διερεύνηση των ακραίων γεγονότων υετού έδειξε ότι οι μεταβολές τους δεν ακολουθούν πάντοτε τις αντίστοιχες μεταβολές του συνολικού υετού. Αν και σε αρκετές περιοχές παρατηρείται κοινή συμπεριφορά μεταξύ συνολικού και ακραίου υετού, εντοπίστηκαν και χαρακτηριστικές εξαιρέσεις, όπως η δυτική Κρήτη, όπου παρά τη μείωση του συνολικού υετού καταγράφεται αύξηση τόσο της συχνότητας όσο και της έντασης των ακραίων επεισοδίων, καθώς και της συμβολής τους στον συνολικό υετό. Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ότι σε ορισμένες περιοχές ο υετός τείνει να συγκεντρώνεται ολοένα και περισσότερο σε λιγότερα αλλά πιο έντονα επεισόδια υετού, γεγονός με ιδιαίτερη σημασία για την εμφάνιση πλημμυρικών φαινομένων και τη διαχείριση των υδατικών πόρων. Παράλληλα, η ανάλυση των υποπεριόδων ανέδειξε ότι οι πρόσφατες δεκαετίες χαρακτηρίζονται από ενίσχυση των ακραίων φαινομένων υετού κυρίως στα βορειοδυτικά και κεντρικά της ηπειρωτικής χώρας και στην Κρήτη, ενώ άλλες περιοχές, όπως η Χαλκιδική, η ανατολική Μακεδονία, η νοτιοδυτική Πελοπόννησος και τμήματα του ανατολικού Αιγαίου, εμφανίζουν αντίθετη συμπεριφορά. Η εικόνα αυτή αναδεικνύει την έντονη χωρική ανομοιογένεια και την τοπικότητα που χαρακτηρίζει τα ακραία γεγονότα υετού στην Ελλάδα.

Συνολικά, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας βρίσκονται σε συμφωνία με τη διεθνή και ελληνική βιβλιογραφία, επιβεβαιώνοντας ότι ο υετός στην Ελλάδα χαρακτηρίζεται από έντονες χωρικές διαφοροποιήσεις και από διαχρονικές μεταβολές. Ο συνδυασμός της χωρικής ανάλυσης, των τάσεων και των δεικτών ακραίου υετού αναδεικνύει τη σημαντικότητα αυτών των αναλύσεων καθώς οι παράμετροι αυτοί επηρεάζουν καθοριστικά τον υδρολογικό κύκλο, τη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων και την εμφάνιση φυσικών καταστροφών.

Τέλος, προοπτική της παρούσας εργασίας αποτελεί η περαιτέρω διερεύνηση των μηχανισμών που οδήγησαν στη σημαντική μείωση του υετού κατά τη δεκαετία του 1980, μέσω της συσχέτισής της με δείκτες μεγάλης κλίμακας ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, όπως η Βόρεια Ατλαντική Ταλάντωση. Επίσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περαιτέρω διερεύνηση του ακραίου υετού, μελετώντας τον από πλευράς δυναμικής του φαινομένου μέσω της ανάλυσης των σχετικών ατμοσφαιρικών διεργασιών, ιδιαίτερα κατά τις πρόσφατες δεκαετίες.

ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η έρευνα του καθεστώτος νετού στην Ελλάδα για το χρονικό διάστημα 1950-2024 έδειξε πως υφίστανται αρκετές περιοχές που χαρακτηρίζονται από μείωση του νετού αλλά και ταυτόχρονα κάποιες από αυτές τις περιοχές, συγκεκριμένα στη βορειοδυτική Ελλάδα και στη δυτική Κρήτη παρατηρείται αύξηση του ακραίου νετού. Σε αυτές τις περιοχές θα ήταν συνετό να γίνουν μελέτες για αντιπλημμυρικά έργα και συντήρηση των ήδη υφιστάμενων σχετικών υποδομών, ώστε να γίνεται καλύτερη διαχείριση του έντονου νετού και να προέχει η μέριμνα για την ασφάλεια των πολιτών. Επιπλέον, θα ήταν χρήσιμο να γίνει αξιοποίηση της επιφανειακής απορροής, ειδικά στις περιοχές όπου τα ακραία ποσά θα αυξάνονται, μιας και αυτό συνεπάγεται αύξηση της επιφανειακής απορροής. Η αξιοποίηση δύναται να πραγματοποιηθεί με τις μεθόδους που απεικονίζονται στις δύο παρακάτω εικόνες.



Σχήμα 1. Συλλογή βρόχινου νερού από την επιφάνεια της ταράτσας σε δεξαμενή στα αριστερά(www.verivox.de), συλλογή βρόχινου νερού από την επιφάνεια θερμοκηπίου σε δεξαμενή ή πηγάδι χωραφιού (στα δεξιά) .

Στις περιοχές όπου πλήττονται από λειψυδρία θα μπορούσε να συνεισφέρει η μέθοδος περισυλλογής του νερού από επιφάνειες σε δεξαμενές. Επίσης, η συλλογή του νερού από επιφάνεια απορροής σε δεξαμενές ή πηγάδια δύναται να είναι χρήσιμο για το πότισμα καλλιεργειών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Alexandridis, V., Stefanidis, S., and Dafis, S.: Evaluation of ERA5 and ERA5-Land reanalysis precipitation data with rain gauge observations in Greece, *Environmental Sciences Proceedings*, 26, 104, <https://doi.org/10.3390/environsciproc2023026104>, 2023.

Bartzokas, A., and Metaxas, D. A.: Covariability and climatic changes of the lower-troposphere temperatures over the Northern Hemisphere, *Il Nuovo Cimento C*, 16, 359–373, <https://doi.org/10.1007/BF02507647>, 1993.

Bartzokas, A., Lolis, C. J., and Metaxas, D. A.: A study on the intra-annual variation and the spatial distribution of precipitation amount and duration over Greece on a 10 day basis, *International Journal of Climatology*, 23, 207–222, <https://doi.org/10.1002/joc.874>, 2003

Giorgi, F.: Climate change hot-spots, *Geophysical Research Letters*, 33, L08707, <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>, 2006.

Deitch, M. J., Sapundjieff, M. J., and Feirer, S. T.: Characterizing precipitation variability and trends in Mediterranean climates, *Water*, 9(4), 259, <https://doi.org/10.3390/w9040259>, 2017.

Feidas, H., Nouloupoulou, C., Makrogiannis, T., and Bora-Senta, E.: Trend analysis of precipitation time series in Greece and their relationship with circulation using surface and satellite data: 1955–2001, *Theoretical and Applied Climatology*, 87, 155–177, <https://doi.org/10.1007/s00704-006-0200-5>, 2007.

Feidas, H., Karagiannidis, A., Keppas, S., Vaitis, M., Kontos, T., Zanis, P., Melas, D., & Anadranistakis, E.: Modeling and mapping temperature and precipitation climate data in Greece using topographical and geographical parameters, *Theoretical and Applied Climatology*, 118, 133–146, <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1052-4>, 2013

Fotiadi, A. K., Metaxas, D. A., and Bartzokas, A.: A statistical study of precipitation in northwest Greece, *International Journal of Climatology*, 19, 1221–1232, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199909\)19:11<1221::AID-JOC436>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199909)19:11<1221::AID-JOC436>3.0.CO;2-H), 1999.

González-Hidalgo, J. C. and Vicente-Serrano, S. M.: Is there a precipitation decline in the Mediterranean region? An assessment based on the scientific literature, *International Journal of Climatology*, 45(9), <https://doi.org/10.1002/joc.8918>, 2025

Hurrell, J. W.: Decadal trends in the North Atlantic Oscillation, *Science*, 269, 676–679, 1995

Hurrell, J. W., and van Loon, H.: Decadal variations associated with the North Atlantic Oscillation, *Climate Change*, 36, 301–326, 1997.

Hatzianastassiou, N., Katsoulis, B., Pnevmatikos, J., and Antakis, V.: Spatial and Temporal Variation of Precipitation in Greece and Surrounding Regions Based on Global Precipitation Climatology Project Data, *Journal of Climate*, 21, 1349–1370, <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1682.1>, 2008.

- Hatzianastassiou, N., Papadimas, C. D., Lolis, C. J., Bartzokas, A., Levizzani, V., Pnevmatikos, J. D., and Katsoulis, B. D.: Spatial and temporal variability of precipitation over the Mediterranean Basin based on 32-year satellite Global Precipitation Climatology Project data. Part II: inter-annual variability and trends, *International Journal of Climatology*, 36, 4755–4766, <https://doi.org/10.1002/joc.4665>, 2016.
- Kalimeris, A., Ranieri, E., Founda, D., and Norrant, C.: Variability modes of precipitation along a central Mediterranean area and their relations with ENSO, NAO, and other climatic patterns, *Atmospheric Research*, 198, 56–80, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.07.031>, 2017.
- Lagouvardos K., Dafis S., Kotroni V., Kyros G. and Giannaros C.: Exploring Recent (1991–2020) Trends of Essential Climate Variables in Greece, *Atmosphere*, 15, 1104, <https://doi.org/10.3390/atmos15091104>, 2024
- Lolis, C. J.: High-resolution precipitation over the southern Balkans. *Climate Research*, 55, 167–179. <https://doi.org/10.3354/cr01132>, 2012
- Markonis, Y., Hanel, M., Máca, P., Kysely, J., and Cook, E. R.: Temporal and spatial variability of rainfall over Greece, *Theoretical and Applied Climatology*, 124, 1–13, <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1403-7>, 2016.
- Maheras, P., and Anagnostopoulou, C.: Circulation types and their influence on the interannual variability and precipitation changes in Greece, *Mediterranean Climate. Regional Climate Studies*, 215–239, 2003
- Muggeo, V. M. R.: Estimating regression models with unknown break-points, *Statistics in Medicine*, 22, 3055–3071, <https://doi.org/10.1002/sim.1545>, 2003.
- Muggeo, V. M. R.: segmented: An R package to fit regression models with broken-line relationships, *R News*, 8, 20–25, 2008.
- Mann, H. B.: Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 13, 245–259, 1945.
- Nastos, P. T., and Zerefos, C. S.: Climate change and precipitation variability in Greece, *Hellenic Journal of Geosciences*, 45, 67–76, 2010.
- Philandras, C. M., Nastos, P. T., Kapsomenakis, J., Douvis, K. C., Tselioudis, G., and Zerefos, C. S.: Long term precipitation trends and variability within the Mediterranean region, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 3235–3250, <https://doi.org/10.5194/nhess-11-3235-2011>, 2011.
- Pnevmatikos, J. D., and Katsoulis, B. D.: The changing rainfall regime in Greece and its impact on climatological means, *Meteorological Applications*, 13, 331–345, <https://doi.org/10.1017/S1350482706002350>, 2006
- Retalis A., Katsanos D., Lemesios I. and Giannakopoulos C.: Analysis of Precipitation Climatology Trends over Greece Based on Gridded Observational and Reanalysis Databases, *Climate*, 14(2), 41, <https://doi.org/10.3390/cli14020041>, 2026

Richman, M. B.: Rotation of principal components, *Journal of Climatology*, 6(3), 293–335, <https://doi.org/10.1002/joc.3370060305>, 1986.

Rousi, E., Rust, H. W., Ulbrich, U., and Anagnostopoulou, C.: Implications of winter NAO flavors on present and future European climate, *Climate*, 8, 13, <https://doi.org/10.3390/cli8010013>, 2020.

Seager, R., Osborn, T. J., Kushnir, Y., Simpson, I. R., Nakamura, J., and Liu, H.: Climate variability and change of Mediterranean-type climates. *Journal of Climate*, 32(10), 2887–2915. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0472.1>, 2019.

Sen, P. K.: Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau, *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379–1389, 1968.

Schneider, D. P., Deser, C., Fasullo, J. and Trenberth, K. E.: Climate Data Guide Spurs Discovery and Understanding. *Eos Trans. AGU*, 94, 121–122, <https://doi.org/10.1002/2013eo130001>, 2013

Theil, H.: A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen*, 53, 386–392, 521–525, 1397–1412, 1950

Todaro, V., D'Oria, M., Secci, D., Zanini, A., and Tanda, M. G.: Climate change over the Mediterranean region: local temperature and precipitation variations at five pilot sites, *Water*, 14, 2499, <https://doi.org/10.3390/w14162499>, 2022.

Varlas, G., Stefanidis, K., Pytharoulis, I., Katsafados, P., Papaioannou, G., Panagopoulos, Y., Papadopoulos, A., and Dimitriou, E.: Unravelling precipitation trends in Greece since 1950s using ERA5 climate reanalysis data, *Climate*, 10, 14, <https://doi.org/10.3390/cli10010014>, 2022.

Zittis, G.: Observed rainfall trends and precipitation uncertainty in the vicinity of the Mediterranean, Middle East and North Africa, *Theoretical and Applied Climatology*, 134, 1207–1230, <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2333-0>, 2017

Βιβλία:

Ζιακόπουλος, Δ.: Καιρός. Ο γιος της Γης και του Ήλιου «η γνώση», Τόμος Ι, *Artio stamp επε*, 259 pp, 2008.

Φλόκας, Α. Α.: Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας. *Εκδόσεις Ζήτη*, 480 pp, 1994.

Kendall, M. G.: Rank correlation methods, 4th ed., *Charles Griffin*, 202 pp., 1975.

Manly, B. F. J.: Multivariate statistical methods: a primer, 2nd ed., *Chapman & Hall*, 210 pp., 1986.

Aguado, E., Burt, E.J.: Ο Καιρός & το Κλίμα «ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ & ΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ», *Των*, 601 pp., 2013.

Ahrens, C. D.: Meteorology today «An introduction to weather, climate, and the environment», 9th ed., Brooks/Cole, 621 pp, 2009.

Έκθεση Ερευνητικών Αποτελεσμάτων (Reports):

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

Pillosu, F. M., Hewson, T. D., Gascón, E., Vuković, M., Prudhomme, C., and Cloke, H. L.: Bridging the scale gap: enhancing point-scale rainfall estimates by post-processing ERA5, ECMWF Technical Memorandum No. 933, *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, October 2025.

Ηλεκτρονική βιβλιογραφία:

Copernicus Climate Change Service (C3S): ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2019. DOI: [10.24381/cds.e2161bac](https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac) (Last Accessed on 01-05-2025)

Hurrell, James & Phillips, Adam & National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). Last modified 2025-12-11 "The Climate Data Guide: Hurrell North Atlantic Oscillation (NAO) Index (PC-based)." Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-pc-based> on 05-03-2026.

Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI). (n.d.). *Climate change indices*. World Meteorological Organization. Retrieved from https://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml

IPCC: Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers, Figure 2.3.1., 2023 <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>

Muñoz Sabater, J.: ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2019. DOI: [10.24381/cds.e2161bac](https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac) (Last Accessed on 01-05-2025)

Google Earth: <https://earth.google.com>

Wikipedia: https://el.wikipedia.org/wiki/Γεωγραφία_της_Ελλάδας

National Oceanic and Atmospheric Administration: <https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/layers-of-atmosphere>

Circulation patterns in Hadley, Ferrel, and polar cells, according NOAA: <https://www.noaa.gov/jetstream/global/global-atmospheric-circulations>

Climate Variability: North Atlantic Oscillation: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-north-atlantic-oscillation>

Cloud types: <https://www.sciencelearn.org.nz/images/691-cloud-types>

Cloud categories: www.cloudatlas.wmo.int

Fronts: <https://stratusdeck.co.uk/fronts>

Fronts: <https://www.pmfias.com/fronts-frontogenesis-stationary-front-cold-front-warm-front-occluded-front/>

Fronts: <https://meteo.gr/pdf/susfiksh.pdf>

High and low pressure systems: www.stogieraweather.weebly.com

High and low pressure systems: www.slideserve.com

Σχηματισμός Χαλαζόπτωσης: https://www.meteo.gr/article_view.cfm?entryID=662

NCAR, Hurrell North Atlantic Oscillation (NAO) Index (station-based): <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-station-based>