ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Διερεύνηση χωροχρονικής κατανομής επεισοδίων μετεωρολογικής ξηρασίας στην Ελλάδα για την περίοδο 1950-2020.

του

Κωνσταντίνου Χατζαντώνη

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Υποβλήθηκε στη Σχολή
Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος
του Πολυτεχνείου Κρήτης
Για το Δίπλωμα Μηχανικού Περιβάλλοντος

Υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή Αριστείδη Κουτρούλη

Επιτροπή

Αριστείδης Κουτρούλης (Αν. Καθ.)
Διονυσία Κολοκοτσά (Καθ.)
Εμμανουήλ Γρυλλάκης (ΕΔΙΠ)

Χανιά, Ελλάδα Ιούλιος, 2025

Copyright ©TUC, 2022
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα και των επιβλεπόντων καθηγητών. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεών του (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright ©TUC, 2022
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission either from the author or the supervisor(s). Reproducing, storing, and distributing this thesis for non-profitable, educational, or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and inclusion of the present text. Any queries concerning the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Chemical and Environmental Engineering of the Technical University of Crete (TUC) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organization (L. 5343/1932, art. 202).

Περίληψη

Η ξηρασία είναι μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις της εποχής μας, με επιπτώσεις που επηρεάζουν τα οικοσυστήματα, την οικονομία και τις ανθρώπινες κοινωνίες. Καθώς η παγκόσμια θερμοκρασία αυξάνεται λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου, είναι φυσικό επακόλουθο τα φαινόμενα της ξηρασίας να γίνονται συχνότερα και να παρουσιάζουν μεγαλύτερη ένταση και διάρκεια. Η ξηρασία ως φυσικό φαινόμενο είναι η έλλειψη υδάτινων πόρων με δυσμενείς επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον, ενώ επηρεάζει αρνητικά την οικονομία και την καθημερινότητα των ανθρώπων. Στη Μεσόγειο ιδιαίτερα, περιοχή η οποία θεωρείται σημείο αναφοράς υπερθέρμανσης, είναι λογικό να παρουσιάζονται μοναδικές προκλήσεις, όπως παρατεταμένες ξηρασίες, οι οποίες θα μελετηθούν στη συγκεκριμένη περίπτωση.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στον υπολογισμό και την εφαρμογή του δείκτη SPI από μετεωρολογικά δεδομένα των τελευταίων 70 χρόνων. Στόχος είναι η ταυτοποίηση περιόδων ξηρασίας στον ελλαδικό χώρο και η δημιουργία χαρτών που απεικονίζουν τη διάρκεια, την ένταση και την εξάπλωση των ξηρασιών προκειμένου να συμβάλλουν στη διαχείριση των υδάτινων πόρων και στην κατανόηση των κλιματικών τάσεων. Ως αποτέλεσμα, αναπτύχθηκε ένας «Άτλας» ξηρασίας για την Ελλάδα (1951–2020), παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με την εμφάνιση, τις επιπτώσεις και τους κινδύνους των ξηρασιών στη χώρα.

Abstract

Drought is one of the most significant challenges of our time, with far-reaching consequences for ecosystems, the economy, and human societies. As global temperatures rise due to the greenhouse effect, it is expected that drought events will become more frequent, intense, and prolonged. Drought, as a natural phenomenon, is characterized by water scarcity, leading to adverse effects on the environment, while also negatively impacting the economy and daily human activities. The Mediterranean region, in particular, is considered a hotspot for global warming, making it highly susceptible to unique challenges such as prolonged drought periods, which will be examined in this study.

This thesis focuses on the calculation and application of the Standardized Precipitation Index (SPI) based on meteorological data from the past 70 years. The primary objective is to identify drought periods in Greece and develop maps that illustrate the duration, intensity, and spatial extent of drought events. These findings aim to support water resource management and enhance the understanding of climatic trends. As an outcome, a Drought Atlas for Greece (1951–2020) was created, providing valuable insights into the occurrence, impacts, and risks associated with droughts in the country.

Ευχαριστίες

Φτάνοντας στο τέλος της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω ορισμένα άτομα, χωρίς τα οποία ίσως να μην καταφέρω να ολοκληρώσω την παρούσα διπλωματική εργασία και κατ' επέκταση και των σπουδών μου.

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή και επιστημονικό μου μέντορα τον κ. Κουτρούλη Αριστείδη. Τον ευχαριστώ, που με εισήγαγε στο ενδιαφέρον αυτό θέμα, και για την συνεχή του καθοδήγηση σχετικά με την παρούσα μελέτη και για τη συνεχή καθοδήγησή του, η οποία με βοήθησε να επανέλθω όταν απομακρυνόμουν από τον στόχο.

Ένα ξεχωριστό ευχαριστώ αναλογεί και στην Μιχαέλα Παπά που συνέβαλε σε μεγάλο βαθμό με τις επιστημονικές της γνώσεις και την άριστη κατάρτισή της σε οτιδήποτε έχει να κάνει με τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές.

Δεν γίνεται φυσικά να μην αναφερθεί η συνεισφορά της Καθηγήτριας Δρ. Διονυσία Κολοκοτσά και του Δρ. Μανώλη Γρυλλάκη (ΕΔΙΠ) που αποτέλεσαν μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, και αφιέρωσαν χρόνο για την αξιολόγηση της εργασίας μου και παρείχαν εποικοδομητικά και επιμορφωτικά σχόλια. Γι' αυτό και τους αναλογεί ένα τεράστιο ευχαριστώ.

Ένα ξεχωριστό ευχαριστώ απευθύνεται προς την οικογένεια μου στη Σύρο για την οικονομική και ψυχολογική στήριξη και πάνω από όλα για τις αξίες που μου μετάδωσαν ώστε να γίνω ένας άξιος αυριανός πολίτης και επιστήμονας. Τέλος, στην οικογένειά μου συμπεριλαμβάνω και τη σύζυγό μου Νάνσυ, η οποία ήταν πάντα στα καλά και στα άσχημα δίπλα μου, την ευχαριστώ.

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή 1
1.1 Πεδίο έρευνας 2
1.2 Δομή εργασίας 4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο 5
2.1 Ορισμοί και Τύποι Ξηρασίας 6
2.2 Περιοχή Μελέτης 9
2.3 Ξηρασία στη Μεσόγειο και την Ελλάδα 9
2.4 Σκοπός και Ερευνητικά Ερωτήματα 12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Μεθοδολογία και δεδομένα 13
3.1 Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων 14
3.2 Υπολογισμός του Standardized Precipitation Index (SPI) 15
3.3 Προσδιορισμός γεγονότων ξηρασίας με βάση κατώφλια SPI 15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Αποτελέσματα 21
4.1 Χρονική εξέλιξη του SPI-12 και προσδιορισμός των γεγονότων ξηρασίας. 22
4.2 Χαρακτηρισμός γεγονότων ξηρασίας. 24
4.3 Ανάλυση γεγονότων ξηρασίας. 30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα 37
5.1 Κύρια συμπεράσματα και προστιθέμενη αξία της εργασίας. 38
5.2 Περιορισμοί της εργασίας 40
5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα. 40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ 44

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3-1: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογικής διαδικασίας της παρούσας μελέτης 20
Διάγραμμα 4-1: Ποσοστό επιρροής ανά έτος για ολόκληρη την περιοχή μελέτης, βάσει του SPI-12. Οι γραμμές υποδεικνύουν το ποσοστό της περιοχής μελέτης το οποίο βρίσκεται υπό συνθήκες ξηρασίας, σύμφωνα με τρία διαφορετικά κατώτατα όρια του SPI (τιμές κατώφλι): SPI12 < 20% ή –0,84 (μαύρη γραμμή), SPI12 < 30% ή –1,28 (γκρι γραμμή), SPI12 < 39% ή –1,65 (κόκκινη γραμμή). 23
Διάγραμμα 4-2: Εποχικότητες των γεγονότων ξηρασίας. 26
Διάγραμμα 4-3 (a), (b) και (c) : Έναρξη γεγονότων ξηρασίας, Λήξη γεγονότων ξηρασίας, Διάρκεια των γεγονότων ξηρασίας 27
Διάγραμμα 4-4: Συσχέτιση μεταξύ μέσης έντασης και έκτασης των 24 γεγονότων ξηρασίας 28
Διάγραμμα 4-5: Μέση έκταση των 24ων γεγονότων ξηρασίας 29
Διάγραμμα 4-6: Μέση ένταση των 24ων γεγονότων ξηρασίας 30
Διάγραμμα 4-7: Ανάλυση γεγονότος 8 31
Διάγραμμα 4-8: Ανάλυση γεγονότος 12 32
Διάγραμμα 4-9: Ανάλυση γεγονότος 13 33
Διάγραμμα 4-10: Ανάλυση γεγονότος 17 34
Διάγραμμα 4-11: Ανάλυση γεγονότος 19 35
Διάγραμμα 4-12: Ανάλυση γεγονότος 22 36

Κατάλογος Χαρτών

Χάρτες 3-1: Χάρτης Ελλάδος με τους σταθμούς και υπολογισμός εμβαδού που αντιστοιχεί στην κάθε περιοχή: 18

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1: Χαρακτηρισμός έντασης ξηρασίας με βάση το SPI 19

Πίνακας 4-1: Εντοπισμένα γεγονότα ξηρασίας και τα χαρακτηριστικά τους. Στον πίνακα αναγράφονται η έναρξη και η λήξη, η εποχικότητα, η διάρκεια σε μήνες, καθώς και η μέση ένταση και έκταση του κάθε γεγονότος. Επιπλέον, σημειώνεται η διάρκεια (μήνες) σε γεγονότα των οποίων η έκταση υπερέβη το 50% της συνολικής επιφάνειας της χώρας, και χαρακτηρίζεται η ένταση αυτών ως ήπια, μέτρια ή έντονη, βάσει των τιμών κατώφλι (0,84, 1,28, 1,65, αντίστοιχα). 25

1

Εισαγωγή

1.1 Πεδίο έρευνας

Η κλιματική κατάσταση που επικρατεί παγκοσμίως είναι ανησυχητική, καθώς η μέση θερμοκρασία του πλανήτη παρουσιάζει συνεχή άνοδο τις τελευταίες δεκαετίες (Kweku et al., 2018). Ως φυσική συνέπεια η αυξανόμενη άνοδος θα επιφέρει σταδιακές αλλαγές, μερικές εκ των οποίων πιθανώς να αποβούν επικίνδυνες. Ένας από τους σοβαρότερους κινδύνους που απορρέουν από αυτή την αλλαγή είναι η ξηρασία, η οποία γίνεται ολοένα και πιο έντονη σε πολλές περιοχές του κόσμου (Seo, 2017).

Η ξηρασία ως ένα φυσικό φαινόμενο, οφείλεται σε παρατεταμένη έλλειψη βροχοπτώσεων, μπορεί να επηρεάσει το περιβάλλον, τη γεωργία, τους υδάτινους πόρους, καθώς και την οικονομία και κοινωνικές δομές (Tramblay et al., 2020), ενώ συχνά σε συνδυασμό με υψηλές θερμοκρασίες, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση των αποθεμάτων γλυκού νερού (McKee et al., 1993). Πρόκειται για φαινόμενο που διαφοροποιείται σημαντικά, τόσο χωρικά όσο και χρονικά, ως προς τη διάρκεια και την ένταση εκδήλωσης του, καθιστώντας πρόκληση την έγκαιρη παρατήρηση και αντιμετώπισή του.

Στη Μεσόγειο ειδικά, η ξηρασία αποτελεί βασικό στοιχείο του κλίματος της, καθώς η περιοχή χαρακτηρίζεται από ζεστά και άνυδρα καλοκαίρια και ήπιους, υγρούς χειμώνες (Cody & Mooney, 1978). Η μείωση των συνολικών βροχοπτώσεων, καθώς και η συχνότερη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων, αυξάνουν τη διάρκεια και ένταση των περιόδων ξηρασίας, δημιουργώντας σοβαρές προκλήσεις (Trullenque-Blanco et al., 2024), ενώ εκτιμάται ότι η κλιματική αλλαγή θα συμβάλλει στη συχνότητα εμφάνισης του φαινομένου (Tramblay et al., 2020).

Η ξηρασία είναι ένα φαινόμενο που επηρεάζει άμεσα και την Ελλάδα (Karamitsiou, 2015) καθώς πρόκειται για μια κατεξοχήν μεσογειακή χώρα. Οι επιπτώσεις της ξηρασίας εκδηλώνονται σε πολλούς τομείς, καθώς μειώνει τους υδατικούς πόρους και πλήττει σοβαρά τη γεωργία, γεγονός το οποίο ασκεί πίεση στη διαχείριση των διαθέσιμων υδάτινων πόρων, ιδιαίτερα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όπου παρατηρείται αυξημένη τουριστική δραστηριότητα. Περιοχές που έχουν επηρεαστεί έντονα από το φαινόμενο αυτό είναι η Κρήτη (ιδιαίτερα το νότιο τμήμα της νήσου), η Πελοπόννησος (με επίκεντρο τη Λακωνία και την Αργολίδα), η Θεσσαλία και τα νησιά του Νότιου Αιγαίου (Livada & Assimakopoulos, 2007).

Ένα από τα σοβαρότερα επακόλουθα της παρατεταμένης ξηρασίας είναι η αύξηση του κινδύνου πυρκαγιών, οι οποίες καταστρέφουν χιλιάδες στρέμματα δασικών εκτάσεων, προκαλούν απώλειες σε ιδιωτικές περιουσίες, απώλεια πανίδας και σε ακραίες περιπτώσεις

θέτουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές (Ligkoni, 2021). Εκτός από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η ξηρασία έχει και σοβαρές οικονομικές συνέπειες. Οι απώλειες στον γεωργικό τομέα είναι σημαντικές, καθώς επηρεάζονται καλλιέργειες όπως τα σιτηρά, οι ελιές και τα αμπέλια, οδηγώντας σε οικονομικές δυσκολίες για τους παραγωγούς (Livada & Assimakopoulos, 2007). Παράλληλα, η μείωση των υδάτινων αποθεμάτων αυξάνει το κόστος άρδευσης και ύδρευσης, κάτι που επιβαρύνει τόσο τους αγρότες όσο και τους πολίτες. Οι υδροφορείς εξαντλούνται, τα ποτάμια και οι λίμνες στερεύουν, ενώ οι γεωτρήσεις απαιτούν ολοένα και μεγαλύτερα βάθη, αυξάνοντας έτσι τον κίνδυνο υφαλμύρινσης στα παράκτια οικοσυστήματα. Επιπλέον, η ξηρασία προκαλεί υποβάθμιση των καλλιεργήσιμων εδαφών, καθιστώντας τα σταδιακά άγονα. Οι συνέπειες της ξηρασίας συνδέονται άμεσα με την ερημοποίηση, την υποβάθμιση των υδάτινων πόρων και την αυξανόμενη ανάγκη για αποτελεσματικότερη διαχείριση του νερού.

Η ξηρασία έχει επίσης κοινωνικές και υγειονομικές επιπτώσεις (Tirivarombo et al., 2018). Η ποιότητα ζωής επιδεινώνεται λόγω της συχνότερης εμφάνισης έντονων θερμικών επεισοδίων, όπως τα κύματα καύσωνα, που εκδηλώνονται με αυξανόμενη συχνότητα στην Ελλάδα (Livada & Assimakopoulos, 2007). Αυτό αυξάνει τον κίνδυνο για την υγεία των ηλικιωμένων και των ευπαθών ομάδων, καθιστώντας τη διαχείριση των ακραίων θερμοκρασιών κρίσιμο ζήτημα για τη δημόσια υγεία.

Καθώς το κλίμα συνεχίζει να αλλάζει, οι ξηρασίες μετατρέπονται από προσωρινά φαινόμενα σε παρατεταμένες καταστάσεις που απειλούν την ισορροπία του οικοσυστήματος και την ανθρώπινη διαβίωση (Moreira et al., 2008). Είναι επείγουσας ανάγκης λοιπόν η εμβάθυνση στο φαινόμενο της ξηρασίας, εντοπίζοντας, καταγράφοντας και μελετώντας συνεχώς τέτοια γεγονότα, με στόχο την έγκαιρη πρόβλεψη και διαχείριση τους.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, επιδιώκει την ανάλυση επίγειων ιστορικών δεδομένων βροχόπτωσης των τελευταίων 70 ετών (Ιανουάριος του 1951 έως Δεκέμβριος του 2020), από 202 σταθμούς μέτρησης βροχόπτωσης σε όλη την επικράτεια, με στόχο τον εντοπισμό και την ερμηνεία των φαινομένων ξηρασίας στον ελλαδικό χώρο. Η μελέτη διεξάγεται κυρίως σε δωδεκάμηνο χρονικό βήμα για τον υπολογισμό του δείκτη SPI-12, που επιτρέπει την αξιολόγηση της ξηρασίας σε μεσοπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η χρονική διάρκεια κάθε ξηρασίας, η εποχικότητα της, καθώς και η γεωγραφική έκταση της. Ιδιαίτερη σημασία έχει δοθεί στην ένταση της ξηρασίας για την πιο σαφή αξιολόγηση του μεγέθους των επιπτώσεων του κάθε γεγονότος. Ο υπολογισμός

αυτών των παραμέτρων θα βοηθήσει στην κατάρτιση χαρτών, οι οποίοι θα περιγράφουν την ιστορική εξέλιξη του φαινομένου στην Ελλάδα, αλλά και να εξαχθούν γενικά συμπεράσματα σχετικά με τη συχνότητα και την ένταση των ξηρασιών.

1.2 Δομή εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από τα ακόλουθα κεφάλαια:

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο και εξηγούνται βασικές έννοιες, όπως ορισμοί και τύποι ξηρασίας, οι επικρατούσες κλιματικές συνθήκες, καθώς και η επίδραση του μεσογειακού κλίματος στην ξηρασία. Πραγματοποιείται σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση της υπάρχουσας έρευνας για τη Μεσόγειο και την Ελλάδα, για την κατανόηση των χαρακτηριστικών και της εξέλιξης της ξηρασίας στην Ελλάδα.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση. Στη συνέχεια, επεξηγείται ο δείκτης SPI και το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε, και καθορίζονται οι χρονικές περίοδοι για τις οποίες διεξήχθη η μελέτη. Με βάση αυτόν τον δείκτη εντοπίζονται τα γεγονότα ξηρασίας στην Ελλάδα και εκτιμάται η ένταση, η διάρκεια και η χωρική τους κάλυψη.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης, όπως η χρονική εξέλιξη του SPI-12, ο προσδιορισμός των γεγονότων ξηρασίας και ο χαρακτηρισμός τους και η ενδελεχής ανάλυση των σημαντικότερων εξ αυτών.

Στο Κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παρούσα εργασία και παρατίθενται προτάσεις για τον εντοπισμό γεγονότων ξηρασίας και την ορθή αξιολόγησή τους.

2

Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Ορισμοί και Τύποι Ξηρασίας

Η ξηρασία αποτελεί ένα φυσικό φαινόμενο που εκδηλώνεται λόγω παρατεταμένης έλλειψης βροχοπτώσεων σε συνδυασμό με υψηλές θερμοκρασίες, με σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και την οικονομία (Wilhite & Glantz, 1985). Το φαινόμενο αυτό μπορεί να διακριθεί σε τέσσερις βασικές υποκατηγορίες: τη μετεωρολογική, τη γεωργική, την υδρολογική και την κοινωνική-οικονομική ξηρασία (Tramblay et al., 2020).

Μετεωρολογική Ξηρασία

Η μετεωρολογική ξηρασία αποτελεί το πρώτο στάδιο εμφάνισης της γενικότερης ξηρασίας (Karamitsiou, 2015), η οποία χαρακτηρίζεται από ένα ασυνήθιστα χαμηλό ύψος βροχόπτωσης σε σχέση με τον κλιματικό μέσο όρο της περιοχής όπου εκδηλώνεται. Ανάλογα με τη διάρκεια και την ένταση της, μπορεί να επηρεάσει σταδιακά και άλλους τομείς, οδηγώντας στην εμφάνιση γεωργικής και υδρολογικής ξηρασίας (Trullenque-Blanco et al., 2024).

Σύμφωνα με τους Canton (2021), η μετεωρολογική ξηρασία ορίζεται ως μια παρατεταμένη περίοδος κατά την οποία τα επίπεδα κατακρημνισμάτων είναι σημαντικά μειωμένα για εβδομάδες, μήνες ή ακόμα και χρόνια, ανάλογα με το κλιματικό πλαίσιο κάθε περιοχής. Η εκδήλωση μετεωρολογικής ξηρασίας εξαρτάται, έτσι, από το τι αποτελεί σύνηθες για την κάθε περιοχή, καθώς διαφορετικές γεωγραφικές ζώνες έχουν ποικίλα επίπεδα φυσιολογικής βροχόπτωσης (Trullenque-Blanco et al., 2024).

Για την αναγνώριση της μετεωρολογικής ξηρασίας απαιτείται η συνύπαρξη ορισμένων βασικών χαρακτηριστικών. Αρχικά, τα επίπεδα βροχόπτωσης πρέπει να είναι χαμηλότερα από τον κλιματικό μέσο όρο για μια εκτεταμένη χρονική περίοδο, που μπορεί να διαρκεί από μήνες έως χρόνια (Naresh Kumar et al., 2009). Επιπλέον, παρατηρείται χωρική διαφοροποίηση στη σοβαρότητα της ξηρασίας, καθώς η έντασή της μπορεί να διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Επίσης, σε αντίθεση με την υδρολογική ξηρασία, η μετεωρολογική ξηρασία δεν γίνεται άμεσα ανιχνεύσιμη, καθώς τα αποθέματα νερού δεν μειώνονται αμέσως (Καραμπουρνιώτης, 2012), αλλά αποτελεί την αρχική ένδειξη μιας πιθανής μελλοντικής κρίσης στους υδάτινους πόρους.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μετεωρολογικής ξηρασίας στην Ελλάδα είναι η περίοδος 2007–2008, η οποία διήρκησε για μεγάλο χρονικό διάστημα και χαρακτηρίστηκε από ακραία μείωση των βροχοπτώσεων(Karamitsiou, 2015).

Υδρολογική Ξηρασία

Η υδρολογική ξηρασία αποτελεί το επόμενο είδος ξηρασίας και ορίζεται ως η μείωση των υδάτινων πόρων, όπως η ροή των ποταμών, η στάθμη των λιμνών και των υπόγειων υδροφορέων, λόγω της παρατεταμένης έλλειψης βροχοπτώσεων (Mathbout et al., 2021). Αυτή η μορφή ξηρασίας επηρεάζει την ποσότητα και την ποιότητα του διαθέσιμου νερού, το οποίο χρησιμοποιείται για καθημερινές ανάγκες, όπως η ύδρευση, η άρδευση και η παραγωγή ενέργειας (Lopez-Bustins et al., 2013).

Βασικά χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν την υδρολογική ξηρασία είναι η μείωση τόσο των επιφανειακών όσο και των υπόγειων υδάτινων αποθεμάτων. Σε αντίθεση με τη μετεωρολογική ξηρασία, οι επιπτώσεις της υδρολογικής ξηρασίας εκδηλώνονται με χρονική καθυστέρηση, καθώς η μείωση των υδάτινων πόρων γίνεται εμφανής μόνο μετά από παρατεταμένες περιόδους μειωμένων βροχοπτώσεων (Trullenque-Blanco et al., 2024). Επιπλέον, η υδρολογική ξηρασία απαιτεί μακροχρόνια και έντονα ξηρά διαστήματα, καθώς τα υδάτινα αποθέματα δεν επηρεάζονται άμεσα από μικρές διακυμάνσεις στη βροχόπτωση, αλλά από τη συνολική συσσώρευση ελλείψεων νερού σε βάθος χρόνου (Agnew, 2000).

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα υδρολογικής ξηρασίας στην Ελλάδα είναι η περίοδος 1988 – 1993 στην Αθήνα, όπου η παρατεταμένη έλλειψη βροχοπτώσεων είχε ως αποτέλεσμα τη δραματική μείωση των υδρολογικών αποθεμάτων. Η κατάσταση αυτή οδήγησε την ελληνική κυβέρνηση στη λήψη μέτρων περιορισμού της κατανάλωσης νερού (Καραμπουρνιώτης, 2012).

Γεωργική Ξηρασία

Η γεωργική ξηρασία αποτελεί το δεύτερο στάδιο εξέλιξης του φαινομένου και ορίζεται ως η μείωση της υγρασίας του εδάφους σε τέτοιο βαθμό ώστε να επηρεάζει αρνητικά τη γεωργική παραγωγή. Αυτό συμβαίνει όταν η υγρασία του εδάφους δεν επαρκεί για την ανάπτυξη των φυτών, οδηγώντας σε περιορισμένη βλάστηση, μειωμένη ανθοφορία και χαμηλές αποδόσεις στις καλλιέργειες (Tirivarombo et al., 2018).

Για την αναγνώριση της γεωργικής ξηρασίας πρέπει να πληρούνται ορισμένα κριτήρια. Καταρχάς, η έλλειψη επαρκούς υγρασίας στο έδαφος πρέπει να είναι εμφανής και να επηρεάζει άμεσα την ανάπτυξη των καλλιεργειών. Η γεωργική ξηρασία είναι στενά συνδεδεμένη με τη μετεωρολογική, καθώς μια παρατεταμένη περίοδος μειωμένων βροχοπτώσεων οδηγεί σταδιακά στην ξήρανση του εδάφους και στην επιδείνωση της

φυτικής ανάπτυξης (Tramblay et al., 2020). Παράλληλα, η επίδραση της γεωργικής ξηρασίας διαφέρει ανάλογα με τον τύπο των καλλιεργειών, καθώς διαφορετικά φυτά έχουν διαφορετικές ανάγκες σε νερό. Για παράδειγμα, οι ελιές και τα αμπέλια είναι πιο ανθεκτικά στην ξηρασία από ό,τι τα σιτηρά ή τα λαχανικά. Επιπλέον, οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους επηρεάζουν την αντοχή του στην ξηρασία. Εδάφη με υψηλό πορώδες, για παράδειγμα, συγκρατούν περισσότερο νερό, με αποτέλεσμα να είναι πιο ανθεκτικά σε παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας (Livada & Assimakopoulos, 2007).

Τα τελευταία χρόνια, ένα ενδεικτικό παράδειγμα γεωργικής ξηρασίας στην Ελλάδα αποτελεί η χαρακτηριστική μείωση στην παραγωγή καλλιεργειών αραβοσίτου. Κύριο πλήγμα δέχτηκε η περιοχή της Ανατολικής Ελλάδας (Mamasis,2007). Το 2015, οι παρατεταμένες ξηροθερμικές συνθήκες σε συνδυασμό με τη μείωση των διαθέσιμων υπόγειων υδάτων οδήγησαν σε έντονη πτώση της παραγωγής, όπου η απόδοση της συγκομιδής δεν πληρούσε το ελάχιστο αποδεκτό όριο απόδοσης ανά στρέμμα (Tsouvalas, 2022).

Κοινωνικοοικονομική Ξηρασία

Το τελευταίο είδος ξηρασίας είναι η κοινωνικοοικονομική , η οποία αφορά τις επιπτώσεις της έλλειψης νερού στην κοινωνία και την οικονομία. Σε αυτήν τη μορφή ξηρασίας, οι φυσικές συνθήκες αλληλοεπιδρούν άμεσα με τις ανθρώπινες δραστηριότητες, καθώς η μειωμένη διαθεσιμότητα υδάτινων πόρων οδηγεί σε δυσλειτουργίες στην παραγωγή αγαθών και υπηρεσιών (Trullenque-Blanco et al., 2024). Εκδηλώνεται όταν η ζήτηση για υδάτινους πόρους υπερβαίνει τη διαθέσιμη προσφορά, προκαλώντας προβλήματα τόσο στην καθημερινή ζωή όσο και στη γενικότερη οικονομική σταθερότητα.

Βασικά χαρακτηριστικά της κοινωνικοοικονομικής ξηρασίας είναι η ανισορροπία μεταξύ της ζήτησης και της προσφοράς νερού ή προϊόντων που εξαρτώνται από αυτό, όπως τα αγροτικά προϊόντα και η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Σε περιόδους ξηρασίας, η προσφορά αυτών των αγαθών μειώνεται, με αποτέλεσμα να μην καλύπτονται οι ανάγκες των καταναλωτών (McKee et al., 1993). Επιπλέον, η κοινωνικοοικονομική ξηρασία έχει άμεση επίδραση στην οικονομία, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των τιμών των τροφίμων, μείωση της αγροτικής παραγωγής, απώλεια θέσεων εργασίας και οικονομική αστάθεια (Tramblay et al., 2020). Οι κοινωνικές της επιπτώσεις περιλαμβάνουν τη μείωση της ποιότητας ζωής, προβλήματα υγείας λόγω έλλειψης καθαρού νερού, εσωτερική ή διεθνής μετακίνηση πληθυσμών και κοινωνικές εντάσεις (Mathbout et al., 2021).

Τέλος, η κοινωνικοοικονομική ξηρασία δεν αποτελεί ανεξάρτητο φαινόμενο, αλλά προκύπτει ως συνέπεια ενός ή και όλων των προηγούμενων τύπων ξηρασίας. Όταν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της μετεωρολογικής, γεωργικής ή και υδρολογικής ξηρασίας ενταθούν, οι κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες γίνονται όλο και πιο αισθητές, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για αποτελεσματική διαχείριση των υδάτινων πόρων και στρατηγικές μετριασμού του φαινομένου (Trullenque-Blanco et al., 2024).

2.2 Περιοχή Μελέτης

Η Ελλάδα, ως τμήμα της νοτιοανατολικής Ευρώπης, καταλαμβάνει στρατηγική θέση στο σταυροδρόμι Ευρώπης, Ασίας και Αφρικής και χαρακτηρίζεται από έντονο γεωγραφικό ανάγλυφο, μεγάλο μήκος ακτογραμμής και σημαντική νησιωτική έκταση (Petrelis, 2012). Η ποικιλία στη μορφολογία του εδάφους και η διαφοροποίηση του υψομέτρου επηρεάζουν σημαντικά τις τοπικές κλιματικές συνθήκες, καθιστώντας τη χώρα ευάλωτη σε ποικίλες φυσικές καταστροφές (Mimikou & Baltas, 2013). Το ανάγλυφο της Ελλάδας χαρακτηρίζεται από ορεινές περιοχές στο δυτικό και βόρειο τμήμα της, πεδινές εκτάσεις κυρίως στην κεντρική και ανατολική χώρα, καθώς και ένα πολυάριθμο νησιωτικό σύμπλεγμα στο Αιγαίο και Ιόνιο πέλαγος(Petrelis, 2012). Η παρουσία της θάλασσας, που περιβάλλει τη χώρα σχεδόν από όλες τις πλευρές, μετριάζει τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις του μεσογειακού κλίματος. Ωστόσο, οι έντονες τοπικές διαφοροποιήσεις εξαιτίας του συνδυασμού μορφολογικών παραγόντων και της επίδρασης θαλασσίων ρευμάτων και ανέμων, προκαλούν σημαντικές αποκλίσεις στα μικροκλίματα μεταξύ περιοχών που βρίσκονται σε μικρή γεωγραφική απόσταση(Tsesmelis et al., 2022). Το κλίμα της Ελλάδας, το οποίο παρουσιάζει κυρίως μεσογειακά χαρακτηριστικά, παίζει κεντρικό ρόλο στη διαμόρφωση των υδρολογικών και οικολογικών ισορροπιών της χώρας (Giannakopoulos et al., 2011).

2.3 Ξηρασία στη Μεσόγειο και την Ελλάδα

Επίδραση του μεσογειακού κλίματος

Η ξηρασία αποτελεί ένα από τα πιο σοβαρά φυσικά φαινόμενα που επηρεάζουν το μεσογειακό περιβάλλον. Η Ελλάδα, ως χώρα του βορειοανατολικού τμήματος της Μεσογείου, επηρεάζεται άμεσα από τις κλιματικές ιδιαιτερότητες της περιοχής. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της είναι η θερινή ξηρασία, κατά την οποία σημειώνονται υψηλές

θερμοκρασίες και έντονη ηλιακή ακτινοβολία. Τα καλοκαίρια παρατηρούνται ελάχιστες βροχοπτώσεις και υψηλά ποσοστά εξάτμισης του γλυκού νερού, γεγονός που εντείνει την έλλειψη υδάτινων πόρων κατά την περίοδο αυτή (Tramblay et al., 2020). Αντίθετα, οι χειμώνες χαρακτηρίζονται από αυξημένες βροχοπτώσεις, λόγω των δυτικών ατμοσφαιρικών ρευμάτων που προέρχονται από τον Ατλαντικό Ωκεανό και τη Μεσόγειο Θάλασσα (Mathbout et al., 2021). Αν και οι βροχοπτώσεις κατά τη χειμερινή περίοδο μπορεί να είναι αυξημένες, η ένταση και η συγκέντρωσή τους σε μικρό χρονικό διάστημα συχνά υπερβαίνουν τη δυνατότητα του εδάφους να τις απορροφήσει. Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται αυξημένη επιφανειακή απορροή και μειωμένη διήθηση, με σημαντικές απώλειες επιφανειακού νερού προς τη θάλασσα (David Todd, 2005). Έτσι, το νερό δεν αξιοποιείται για τον εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων, περιορίζοντας τη διαθεσιμότητά του κατά τους θερινούς μήνες. Ως συνέπεια, οι κλιματικές ιδιαιτερότητες της περιοχής ενισχύουν τον κίνδυνο παρατεταμένων ξηρασιών, οι οποίες έχουν σημαντικές επιπτώσεις στη γεωργία, στους υδατικούς πόρους και στα οικοσυστήματα της χώρας. Η περιοχή της Μεσογείου, ιδιαίτερα η ανατολική της πλευρά, όπου ανήκει και η Ελλάδα, χαρακτηρίζεται από αυξανόμενη συχνότητα και ένταση επεισοδίων ξηρασίας λόγω της κλιματικής αλλαγής. Οι Mathbout et al. (2021), χρησιμοποιώντας τον δείκτη SPI για την περίοδο 1901–2017, διαπίστωσαν σαφή αυξητική τάση σε πολυετείς ξηρασίες στη Μεσόγειο, επισημαίνοντας τον ρόλο της θερμοκρασιακής ανόδου στη μείωση της διαθεσιμότητας υδάτινων πόρων. Παρόμοια, οι Tramblay et al. (2020) έδειξαν ότι κατά τις δεκαετίες 1990 και 2000–2015, καταγράφηκαν οι σοβαρότερες ξηρασίες, με την εξατμισοδιαπνοή να εντείνει την επίδραση ακόμη και σε περιοχές με μικρή μείωση βροχόπτωσης. Οι προβλέψεις τους δείχνουν ότι μέχρι το τέλος του 21ου αιώνα, η ένταση και η διάρκεια των ξηρασιών θα αυξηθούν περαιτέρω, επηρεάζοντας κρίσιμα τη γεωργία και τα υδάτινα αποθέματα. Οι Gomez-Gomez et al. (2022) ανέπτυξαν ένα ολοκληρωμένο μοντέλο για τη διερεύνηση της μετάδοσης και της αλληλεπίδρασης μεταξύ διαφορετικών τύπων ξηρασίας, το οποίο εφάρμοσαν στη λεκάνη του ποταμού Segura (ΝΑ Ισπανία). Τα αποτελέσματά τους δείχνουν ότι τόσο η περιοχή μελέτης όσο και οι παράκτιες περιοχές της Μεσογείου αναμένεται να παρουσιάσουν επιδείνωση στα χαρακτηριστικά της ξηρασίας. Οι Turco et al. (2017) χρησιμοποίησαν στατιστική ανάλυσης πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (MLR) με δεδομένα πυρκαγιών (EFFIS) και τον δείκτη ξηρασίας SPEI, διαπιστώνοντας σημαντική σχέση μεταξύ των θερινών πυρκαγιών και των ταυτόχρονων συνθηκών ξηρασίας. Επίσης, οι Hertig & Tramblay (2017) εφάρμοσαν στατιστικό καταβιβασμό κλίμακας (Statistical Downscaling) χρησιμοποιώντας τον δείκτη SPI και δεδομένα

ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας από το κλιματικό μοντέλο MPI-ESM-LR για 114 σταθμούς της Μεσογείου. Προβλέπεται αύξηση στη σοβαρότητα και συχνότητα των ξηρασιών για την περίοδο 2070–2100, ιδιαίτερα έντονη στην Ιβηρική Χερσόνησο, την Ελλάδα και την Κύπρο. Επιπλέον, η μελέτη των Trullenque-Blanco et al. (2024) ανέλυσε την εξέλιξη των ξηρασιών στην Ιβηρική Χερσόνησο το χρονικό διάστημα (1916-2020), χρησιμοποιώντας τον δείκτη SPI-12, εντοπίζοντας περιόδους σοβαρής ξηρασίας και καταγράφοντας την κατανομή τους στον χώρο και στον χρόνο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ξηρασίες ακολουθούν συγκεκριμένα κλιματικά πρότυπα, παρουσιάζουν αυξητική τάση τις τελευταίες δεκαετίες και συνδέονται με φαινόμενα όπως η Μεσογειακή Διακύμανση Βροχοπτώσεων (Eshel & Farrell, 2000).

Στην περίπτωση της Ελλάδας, η μελέτη των Livada & Assimakopoulos (2007), με βάση τον SPI και δεδομένα από 23 σταθμούς για την περίοδο 1950–2000, ανέδειξε περιοχές με υψηλή συχνότητα ξηρασιών, όπως τα νησιά του Αιγαίου, η Αττική, η Κρήτη και η Πελοπόννησος κυρίως την εποχή του καλοκαιριού. Σύμφωνα με τους (Politi et al., 2022), οι μελλοντικές προσομοιώσεις υψηλής ανάλυσης για την Ελλάδα, βασισμένες στους δείκτες SPI και SPEI, προβλέπουν αύξηση στη σοβαρότητα και διάρκεια των ξηρασιών. Οι πιο έντονες μεταβολές αναμένονται στην κεντρική και ανατολική Ελλάδα στο άμεσο μέλλον, ενώ οι δυτικές και νότιες περιοχές επηρεάζονται κυρίως μακροπρόθεσμα. Ο (Tigkas, 2008), χρησιμοποίησε τον Δείκτης Αναγνωριστικής Ξηρασίας (RDI) για την παρακολούθηση της ξηρασίας σε τέσσερις περιοχές της Ελλάδας την περίοδο 1955–2002, και ανάπτυξε σύστημα παρακολούθησης για την αξιολόγηση της ξηρασίας. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ως σημαντική ξηρασία την περίοδο 1999–2001. Οι Kalamaras et al. (2010) χρησιμοποιώντας ημερήσια δεδομένα από 14 σταθμούς (1965–2001), εντόπισαν τις πιο σοβαρές ξηρασίες τα έτη 1977, 1990 και 2000/01, με την ξηρασία του 1990 να χαρακτηρίζεται ως η εντονότερη του 20ού αιώνα. Η μελέτη των (Karamitsiou, 2015) καλύπτοντας την περίοδο 1950–2014, επιβεβαιώνει τα ευρήματα αυτά, επισημαίνοντας επιπλέον σημαντικά επεισόδια κατά τις περιόδους 1960–61, 1981–82, 1989–90 και 1999–2000. Τέλος, η μελέτη των Tsesmelis et al. (2022) χρησιμοποίησε και αυτή τον δείκτη SPI με χρονικά βήματα 6 και 12 μηνών για τον εντοπισμό των ξηρασιών στην Ελλάδα κατά την περίοδο 1981–2010, εφαρμόζοντας γεωστατιστικές μεθόδους σε περιβάλλον GIS και αξιοποιώντας δεδομένα από 33 μετεωρολογικούς σταθμούς. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ως σημαντικότερα επεισόδια ξηρασίας τις περιόδους 1989–1990, 1992–1993, 2000 και 2007–2008.

Συνολικά, οι περισσότερες μελέτες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η ένταση και η συχνότητα των ξηρασιών στη Μεσόγειο και ειδικότερα στην Ελλάδα παρουσιάζουν ανοδική τάση, κυρίως λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας και των μεταβολών στην κατανομή των βροχοπτώσεων. Καθίσταται συνεπώς αναγκαία η ταυτοποίηση περιόδων ξηρασίας στον ελλαδικό χώρο και η δημιουργία χαρτών που απεικονίζουν τη διάρκεια, την ένταση και την εξάπλωση των ξηρασιών προκειμένου να συμβάλλουν στη διαχείριση των υδάτινων πόρων και στην κατανόηση των κλιματικών τάσεων.

2.4 Σκοπός και Ερευνητικά Ερωτήματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην ανάλυση της χωροχρονικής εξέλιξης των επεισοδίων μετεωρολογικής ξηρασίας στην Ελλάδα κατά την περίοδο 1951–2020, μέσω της εφαρμογής του δείκτη SPI σε εκτεταμένα και ομογενοποιημένα ιστορικά δεδομένα βροχόπτωσης από όλη την επικράτεια. Επιδιώκεται η συστηματική καταγραφή, αξιολόγηση και χαρτογράφηση των σημαντικότερων περιόδων ξηρασίας, με σκοπό την κατανόηση των τάσεων και προτύπων εμφάνισής τους στο πλαίσιο της κλιματικής μεταβλητότητας. Η εργασία συνεισφέρει με τη δημιουργία ενός "Άτλαντα Ξηρασίας" για την Ελλάδα, εργαλείου χρήσιμου για την επιστημονική κοινότητα και τη χάραξη πολιτικών προσαρμογής.

Τα βασικά ερευνητικά ερωτήματα που επιχειρεί να απαντήσει η μελέτη είναι τα εξής:

- Ποια είναι η συχνότητα και χρονική κατανομή των επεισοδίων μετεωρολογικής ξηρασίας στην Ελλάδα την περίοδο 1951–2020;
- Ποια είναι τα κύρια χαρακτηριστικά των επεισοδίων αυτών (διάρκεια, ένταση, γεωγραφική έκταση), όπως προσδιορίζονται μέσω του δείκτη SPI-12;
- Ποιες γεωγραφικές περιοχές παρουσιάζουν μεγαλύτερη επαναληψιμότητα ή σοβαρότητα ξηρασιών, και σε ποιο βαθμό επηρεάζονται διαχρονικά;
- Παρατηρούνται μακροχρόνιες τάσεις αύξησης ή μετατόπισης στη χωρική/χρονική εμφάνιση της ξηρασίας κατά τη διάρκεια των επτά δεκαετιών;
- Πώς μπορούν τα ευρήματα της μελέτης να αξιοποιηθούν για την υποστήριξη στρατηγικών διαχείρισης των υδατικών πόρων, ιδιαίτερα σε περιοχές με αυξημένη γεωργική ή τουριστική δραστηριότητα;

3

Μεθοδολογία και δεδομένα

3.1 Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από 202 σταθμούς μέτρησης βροχόπτωσης ανά την Ελληνική επικράτεια, κατανεμημένους σε όλη την ελληνική επικράτεια, με στόχο την αντιπροσωπευτική κάλυψη του συνόλου της χώρας. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν και διαχειρίζονται από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ) και το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ) και αποτελούνται από μηνιαίες χρονοσειρές βροχόπτωσης για 70 έτη (1951–2020) όπως φαίνεται και στην εικόνα 3-1 παρακάτω.

year	month	NOA1	WMO16622	WMO16627	WMO16632	WMO16641	WMO16642	WMO16648	WMO16650	WMO16665	WMO16667	WMO16672	WMO16684	WMO16687	WMO16689	WMO16699	WMO16710
1951	1	96.6	84.7	81.4	76.254	218.5	57.888	118.2	260.7	79.472	184.424	101.229	80.454	78.7	119.2	128.167	203.9
1951	2	28.4	23.3	32.4	42.038	164.5	138.5	47.255	98.2	31.281	152.112	65.969	13.035	59.8	84.6	36.932	50.1
1951	3	21.3	42.1	67.2	51.94	119.6	123.7	54.7	101.1	43.526	206.804	64.857	45.777	52.6	110.4	34.426	160.7
1951	4	7.9	52.1	27.4	36.81	9.1	33.9	20	17.4	8.724	9.247	18.677	9.274	17.2	44.9	11.611	2.6
1951	5	22.6	13.6	25.6	69.278	55.9	83.9	19.2	73.6	20.759	21.017	0	13.534	13	32.1	13.348	28.3
1951	6	34.6	22.2	57.9	58.716	1.634	41.7	13.1	3.3	0	0	37.43	0	1.3	12.9	6.914	38.4
1951	7	2.7	47.1	69.6	20.222	0.3	24.449	29.4	0.5	18.982	0	0	7.858	0	1.4	10.201	17.7
1951	8	38.2	28.2	12.337	13.862	6.7	17.2	8.9	16.4	26.909	0	19.454	13.409	3.2	7.5	4.75	19.7
1951	9	19.8	15.1	1	25.489	117.2	10.2	14.8	0	107.708	2.522	84.462	23.076	132.4	64.4	47.122	57.1
1951	10	33.5	145.6	30.7	60.568	499	267.9	192.5	56	133.094	71.457	128.604	48.397	227.9	184.7	37.678	78.5
1951	11	68.8	29	84.4	22.276	162.998	126.4	53.7	109.6	169.44	123.578	235.243	70.288	93.1	91.9	97.619	176.9
1951	12	49.5	33.6	30.8	18.969	176.9	329.5	63.9	74.3	36.478	93.314	43.432	62.305	121.7	116	53.077	124.9
1952	1	45.7	35.5	67.4	32.484	146.4	160.981	57.3	47.4	56.356	120.418	285.721	45.84	129.8	205.8	59.587	123.2
1952	2	44.9	16.9	102.9	28.018	136	122.8	30.708	80.7	30.231	127.496	100.535	43.657	106.1	160.8	55.371	155.5
1952	3	73.9	14.8	44	3.477	59.5	36.8	22.4	54.6	16.991	140.391	43.224	49.145	31.5	40.6	77.317	56.4
1952	4	0.2	19.2	9.6	7.667	8.6	55	7.4	15.3	2.561	1.681	0	9.055	17.9	11.9	10.879	28
1952	5	34.7	61.1	41.1	14.133	8	39.5	59.9	22.6	25.869	32.786	21.288	21.579	4.5	9.2	53.233	23.7
1952	6	3.7	9.7	20.8	43.529	0	30.3	17.5	0.8	22.508	0	19.017	6.174	3.4	13.6	8.294	8.7
1952	7	1.4	15.8	2.9	74.644	36.4	51.694	5	0	3	0	113.051	0.748	8.2	4.6	5.856	2.4
1952	8	0	1.7	0.9	3.266	0	25.6	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	2.2
1952	9	2.7	9.8	11.7	24.803	22.6	47.9	9.2	7.8	4.533	0	12.699	7.921	27.7	4.4	15.452	8.9
1952	10	34.9	31.5	54.3	28.453	52.7	119.4	19.4	62.6	20.582	47.918	184.909	7.235	42.9	53.8	38.149	36
1952	11	85	64.9	225.2	62.767	239.366	325.1	71.4	108.2	50.364	90.96	327.262	49.519	174.4	153	70.365	266.4
1952	12	117.9	91.8	108.6	85.456	289.3	349.7	121.9	176.7	333.341	49.599	116.517	131.532	73.7	53.5	129.778	151.9
1953	1	83.2	32.7	88.8	18.336	266.6	122.816	7	181.1	90.205	229.987	159.103	106.772	145.1	138	111.112	149.8
1953	2	9.5	7.6	49.4	4.516	96.9	136.1	6.444	40.4	10.33	76.901	63.452	15.093	58.8	61.7	16.497	61
1953	3	33.7	8	5.6	3.584	0	19.6	33.1	57.9	27.801	85.748	15.223	31.059	12.3	20.6	44.232	16
1953	4	30.6	36	44.2	35.421	53.6	88.4	41.3	49.7	29.116	25.22	44.813	32.057	39.4	32.7	43.91	29
1953	5	100.3	63.7	34.7	91.177	68.2	174.7	64.4	9.6	50.456	61.369	149.778	30.685	111.5	65.4	46.6	48.7
1953	6	7.2	13.3	32	26.256	41.614	82.7	20.2	8.3	1.61	5.885	27.276	17.65	30.7	58.1	12.786	98.4
1953	7	0.9	13.7	0	11.704	0	14.142	33.9	0	0	0	0	0	0	0	4.789	38.1
1953	8	3.2	15.9	0	11.304	26.1	2.7	22.8	9.2	9.209	0	28.656	0	4	4.1	7.359	0.2
1953	9	2	5.7	8.2	10.303	153.5	6.9	0	21.5	2.446	2.522	50.204	11.288	25.2	15.5	12.026	13.3
1953	10	126.2	51.3	88	60.477	120.1	79	109.5	94.1	54.327	49.599	114.391	74.778	103.7	162.3	143.922	106.7
1953	11	15.6	39.5	2.4	58.428	136.15	61.1	119.1	50.7	70.654	36.989	80.751	47.586	109.3	72.4	21.934	117.4
1953	12	52.5	29.7	34.5	26.485	204.3	87.7	62.3	26.9	32.233	90.792	65.176	52.264	37.5	41.3	54.835	58

Εικόνα 3-1: Ενδεικτικές χρονοσειρές βροχόπτωσης από το σύνολο των 202 σταθμών για 70 έτη.

Η επιλογή των δεδομένων βροχόπτωσης πραγματοποιήθηκε βάσει κριτηρίων ποιότητας και αξιοπιστίας, με σκοπό τη διασφάλιση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων. Από ένα σύνολο άνω των 300 διαθέσιμων σταθμών, επιλέχθηκαν όσοι σταθμοί διέθεταν επαρκή ιστορικά δεδομένα, ώστε να εξασφαλίζεται ποιότητα των διαθέσιμων δεδομένων. Τα δεδομένα ελέγχθηκαν για σφάλματα, ανωμαλίες και συστηματικές μεταβολές, ενώ σταθμοί με μεγάλα κενά δεδομένων αποκλείστηκαν. Οι σταθμοί που τελικά επιλέχθηκαν καλύπτουν όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα την επικράτεια της Ελλάδας και αντιπροσωπεύουν τις διαφορετικές κλιματικές ζώνες της χώρας.

Για την ομογενοποίηση και συμπλήρωση των μηνιαίων χρονοσειρών εφαρμόστηκε μία μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από τους Vicente-Serrano et al. (2010), η οποία εξομαλύνει τυχόν ασυνέχειες και εξασφαλίζει συνέπεια στην ένταση και στη συχνότητα της βροχόπτωσης, διαμορφώνοντας ένα ομογενές και συνεπές σύνολο δεδομένων.

3.2 Υπολογισμός του Standardized Precipitation Index (SPI)

Ο Standardized Precipitation Index ή Δείκτης Τυποποιημένης Βροχόπτωσης (SPI) (McKee et al., 1993) αποτελεί ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο στατιστικό εργαλείο για την αξιολόγηση των συνθηκών υγρασίας και ξηρασίας σε μια περιοχή. Ο δείκτης SPI βασίζεται αποκλειστικά σε δεδομένα βροχόπτωσης και χρησιμοποιείται για να αναγνωριστούν αποκλίσεις από τον μέσο όρο της βροχόπτωσης μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για τη μελέτη τόσο βραχυπρόθεσμων όσο και μακροπρόθεσμων φαινομένων ξηρασίας, καθώς παρέχει τη δυνατότητα εκτίμησης της έντασης, της διάρκειας και της συχνότητάς τους.

Η διαδικασία υπολογισμού του SPI περιλαμβάνει τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων βροχόπτωσης. Αρχικά, απαιτείται η προσαρμογή των χρονοσειρών βροχόπτωσης σε κατανομή Gamma (Thom H.C.S, 1958) και έπειτα η μετατροπή τους σε κανονική κατανομή Gauss (Goodman, 1963).

Η μετατροπή επιτυγχάνεται μέσω του **Τύπου 3-**1, παρακάτω:

$$\mathbf{SPI} = \boldsymbol{\varphi}^{-1}\big(\mathbf{H}(\mathbf{x})\big) \qquad \textbf{(3-1)}$$

Όπου,

- SPI είναι ο Standardized Precipitation Index
- x είναι η αθροιστική βροχόπτωση για το χρονικό διάστημα
- H(x) η σωρευτική πιθανότητα της βροχόπτωσης x, από την κατανομή Gamma που υπολογίζεται από την εξίσωση διωνυμικής κατανομής Gamma **Τύπου 3-2** (Thom, 1958), με παραμέτρους α που αφορά το σχήμα και β που αφορά την κλίμακα.

$$\mathbf{H(x)} = \int_0^x [\mathbf{1} / (\boldsymbol{\Gamma}(\boldsymbol{\alpha})\, \boldsymbol{\beta}\hat{}\boldsymbol{\alpha})]\, \mathbf{t}\hat{}(\boldsymbol{\alpha} - \mathbf{1})\, \mathbf{e}\hat{}(-\mathbf{t}/\boldsymbol{\beta})\, \mathbf{dt} \qquad \textbf{(3-2)}$$

- Φ^{-1} η αντίστροφη συνάρτηση της κανονικής κατανομής με μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση 1

Ο SPI εκφράζει τις αποκλίσεις από τον μέσο όρο ως πολλαπλάσια της τυπικής απόκλισης, διευκολύνοντας τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών περιοχών και χρονικών περιόδων. Οι τιμές του δείκτη κυμαίνονται από αρνητικές έως θετικές, με τιμές μικρότερες από –1 να υποδηλώνουν συνθήκες ξηρασίας, ενώ τιμές μεγαλύτερες από +1 αντιπροσωπεύουν περίσσεια υγρασίας. Οι τιμές κοντά στο 0 χαρακτηρίζουν κανονικές συνθήκες (McKee et al., 1993).

Στην παρούσα εργασία, ο δείκτης SPI εκτιμήθηκε για χρονικές κλίμακες 3, 6, 9, 12, 24 και 48 μηνών. Για την εκτίμηση του δείκτη SPI, σε όλα τα χρονικά βήματα, έγινε χρήση του λογισμικού «SPI Generator» (National Drought Mitigation Center, 2018). Επιλέχθηκαν SPI μικρής διάρκειας, όπως το SPI-3, αλλά και δείκτες μεγαλύτερης διάρκειας, όπως των 48 μηνών (ή 2 ετών), με στόχο να εντοπιστούν τόσο τα γεγονότα μικρής διάρκειας ξηρασίας όσο και τα γεγονότα μακράς διάρκειας. Παρόλο που υπολογίστηκαν SPI για 3, 6, 9, 24 και 48 μήνες, τον κυριότερο ρόλο φέρει το SPI12 στην ανάλυση των αποτελεσμάτων καθώς είναι ο μόνος δείκτης που μελετήθηκε εκτενώς στην παρούσα μελέτη, διότι παρέχει πιο καθαρή απεικόνιση των παρατεταμένων ξηρασιών σε σχέση με βραχύτερες κλίμακες όπως το SPI3 ή το SPI6, ενώ οι κλίμακες SPI24 και SPI48 είναι κατάλληλες για ακραίες μακροχρόνιες τάσεις, αλλά όχι για την ανίχνευση και χαρακτηρισμό μεμονωμένων ξηρασιών (McKee et al., 1993). Τα αποτελέσματα των SPI για τις υπόλοιπες χρονικές περιόδους (δηλαδή 3, 6, 9, 24, 48 μήνες) βρίσκονται περιληπτικά στα παραρτήματα στο τέλος της παρούσας μελέτης.

Για την αξιολόγηση των υπολογισμών και την διασφάλιση της ορθότητάς τους, τα αποτελέσματα από το SPI Generator συγκρίθηκαν δειγματοληπτικά με τιμές που υπολογίστηκαν μέσω της βιβλιοθήκης SPEI η οποία περιλαμβάνει και δυνατότητα υπολογισμού του SPI στο RStudio. Τα αποτελέσματα ήταν απόλυτα ταυτιζόμενα.

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι **Voronoi** και **Thiessen Polygons Τύπος 3-3** (Brassel & Reif, 1979) κατόπιν εισαγωγής των γεωγραφικών δεδομένων όλων των σταθμών. Η προαναφερθείσα μέθοδος διαχωρίζει έναν χώρο σε περιοχές επιρροής γύρω από συγκεκριμένα σημεία (όπως οι μετεωρολογικοί σταθμοί). Κάθε περιοχή ονομάζεται πολύγωνο Voronoi και περιέχει όλα τα σημεία του χώρου που είναι πιο κοντά σε έναν συγκεκριμένο σταθμό από οποιονδήποτε άλλο. Τα όρια αυτών των πολυγώνων καθορίζονται από τις μεσοκάθετες των ευθειών που ενώνουν κάθε σταθμό με τους

γειτονικούς του. Μαθηματικά, για κάθε σημείο Pi από ένα σύνολο σημείων {P1,P2,...,Pn}, το αντίστοιχο πολύγωνο Voronoi ορίζεται ως:

$$\mathbf{V}(\mathbf{P}_i) = \{ \mathbf{x} \in \mathbb{R}^2 \mid \mathbf{d}(\mathbf{x}, \mathbf{P}_i) < \mathbf{d}(\mathbf{x}, \mathbf{P}_j), \forall \mathbf{j} \neq \mathbf{i} \} \quad \textbf{(3-3)}$$

• $V(P_i)$: Το πολύγωνο Voronoi που ανήκει στο σημείο P_i, δηλαδή η περιοχή επιρροής του σταθμούP_i.
• $x \in \mathbb{R}^2$: Το σημείο x είναι οποιοδήποτε σημείο στο επίπεδο, δηλαδή στον γεωγραφικό χώρο.
• $d(x, P_i)$: Η ευκλείδεια απόσταση (συνήθως ευκλείδεια) από το σημείο x μέχρι τον σταθμό P_i.
• $d(x, P_j), \forall j \neq i$: Η απόσταση από το x σε όλους τους υπόλοιπους σταθμούς P_j, εκτός από τονP_i.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την εκτίμηση κατανομής τιμών (όπως βροχόπτωσης) στον χώρο, δίνοντας σε κάθε σταθμό μια επιφάνεια επιρροής, και συχνά εφαρμόζεται σε κλιματικές και γεωγραφικές αναλύσεις, καθώς υπολογίζει μέσες τιμές βαρύτητας με βάση το εμβαδόν των πολυγώνων. Η μέθοδος εφαρμόστηκε στον Χάρτη 3-1, όπως φαίνεται παρακάτω.

Τέλος, από τα παραγόμενα πολύγωνα εξήχθη το εμβαδόν επιρροής, δηλαδή η έκταση κάθε περιοχής, ώστε να υπολογιστεί η συμβολή κάθε σταθμού στη συνολική γεωγραφική περιοχή. Υπολογίστηκε επίσης το ποσοστό επιρροής του εμβαδού κάθε σταθμού ως προς το συνολικό εμβαδόν της χώρας, το οποίο αξιοποιήθηκε στους μεταγενέστερους υπολογισμούς.

Για να γίνουν οι τελικοί υπολογισμοί και να βρεθούν τα ποσοστά ξηρασίας για κάθε χρόνο συγκεντρώθηκαν όλα τα δεδομένα, δηλαδή όλα τα SPI, το εμβαδόν επιρροής και το ποσοστό επιρροής του κάθε εμβαδού.

Με τη χρήση των ποσοστών επιρροής του κάθε εμβαδού και των SPI υπολογίστηκαν οι εκτάσεις ξηρασίας προς συνολική επιφάνεια (σε ποσοστό%) για κάθε σταθμό, για κάθε μήνα και για τα 70 χρόνια που μελετώνται. Τα ποσοστά αυτά αθροίστηκαν και υπολογίστηκαν τα συνολικά ποσοστά της έκτασης της ξηρασίας για κάθε μήνα στην Ελλάδα.

Χάρτης 3-1: Χάρτης Ελλάδος με τους βροχομετρικούς σταθμούς και υπολογισμός εμβαδού που αντιστοιχεί στην κάθε περιοχή επιρροής.

3.3 Προσδιορισμός γεγονότων ξηρασίας με βάση κατώφλια SPI

Ο προσδιορισμός γεγονότων ξηρασίας με βάση κατώφλια SPI (Πίνακας 3-1) αναφέρεται στη διαδικασία αναγνώρισης και κατηγοριοποίησης περιόδων ξηρασίας μέσω του Standardized Precipitation Index (SPI) (McKee et al., 1993). Οι τιμές του SPI και πιο συγκεκριμένα του SPI-12 επιτρέπουν την ταξινόμηση της ξηρασίας σε διάφορα επίπεδα έντασης.

Πίνακας 3-1: Χαρακτηρισμός έντασης ξηρασίας με βάση το SPI

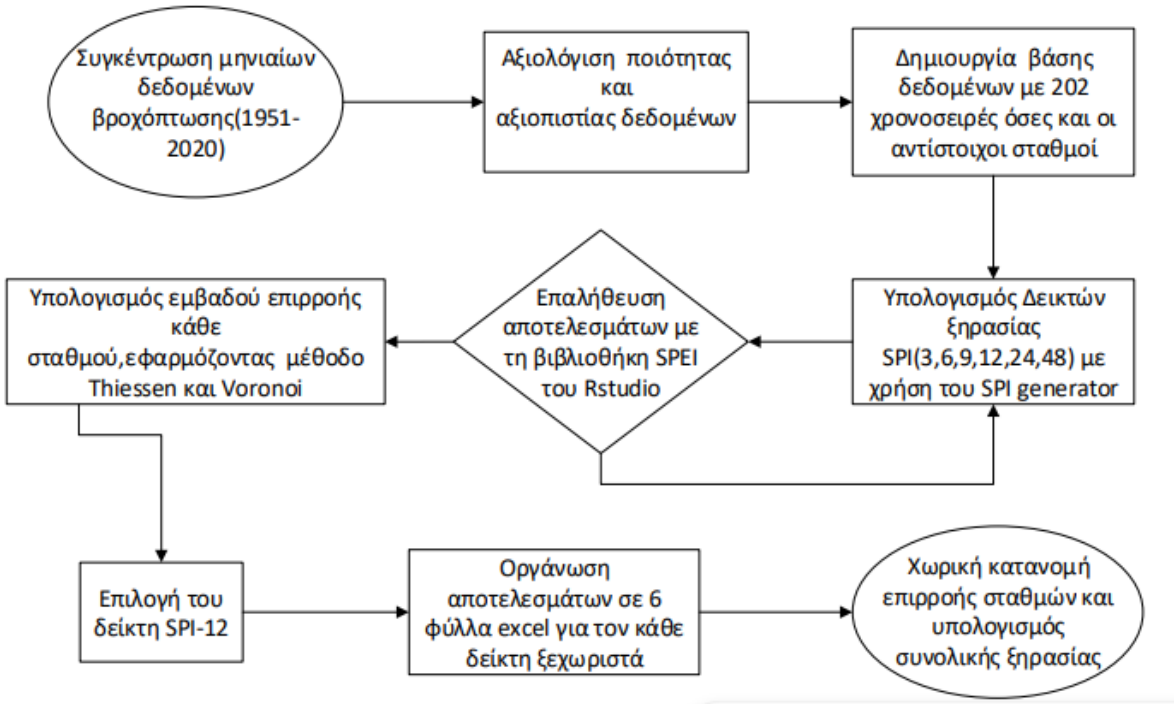
Δείκτης Ξηρασίας (SPI)	Κατηγορία
από 0 έως -0,84	Ήπια ξηρασία
από -0,85 έως -1,28	Μέτρια ξηρασία
<-1,65	Έντονη ξηρασία

Για το χαρακτηρισμό μιας χρονικής περιόδου ως επεισόδιο ξηρασίας, απαιτείται ο δείκτης SPI-12 να λαμβάνει τιμές μικρότερες από –0.84, υποδεικνύοντας τουλάχιστον ήπια ξηρασία. Επιπλέον, η έκταση που επηρεάζεται θα πρέπει να υπερβαίνει το 20% της συνολικής επιφάνειας της χώρας για μια συνεχόμενη χρονική περίοδο τουλάχιστον τριών μηνών. Ένα επεισόδιο θεωρείται διατηρούμενο όταν παρατηρείται αδιάλειπτη ακολουθία μηνών που πληρούν αυτά τα κριτήρια. Ωστόσο, επιτρέπεται η ύπαρξη έως και τριών μηνών διακοπής μεταξύ περιόδων ξηρασίας, υπό την προϋπόθεση ότι τουλάχιστον το 10% της χώρας εξακολουθεί να επηρεάζεται από ξηρασία. Σε περιπτώσεις όπου διακόπτεται η χωρική συνέχεια των επηρεαζόμενων περιοχών, το φαινόμενο καταγράφεται ως δύο διακριτά επεισόδια.

Για την κατηγοριοποίηση της έντασης της ξηρασίας σε μηνιαίο επίπεδο, χρησιμοποιούνται δύο επιπλέον κατώφλια. Ειδικότερα, όταν η έκταση των περιοχών με SPI ≤ –1.28 υπερβαίνει το 30% της συνολικής επιφάνειας της χώρας, η ξηρασία χαρακτηρίζεται ως μέτρια. Αντίστοιχα, όταν το ποσοστό των περιοχών με SPI ≤ –1.65 υπερβαίνει το 39%, η ξηρασία θεωρείται έντονη.

Σε επίπεδο γεγονότος ξηρασίας (δηλαδή για χρονικές περιόδους που καλύπτουν περισσότερους από έναν μήνα), η ένταση προσδιορίζεται από τη μέση τιμή SPI όλων των μηνών του επεισοδίου, ενώ η συνολική έκταση εκτιμάται ως ο μέσος όρος των μηνιαίων ποσοστών επηρεαζόμενης επιφάνειας.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται συνοπτικά η μεθοδολογική διαδικασία που ακολουθήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, από τη συλλογή και αξιολόγηση των δεδομένων μέχρι την ανάλυση των επεισοδίων ξηρασίας.



Διάγραμμα 3-1: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογικής διαδικασίας της παρούσας μελέτης

4

Αποτελέσματα

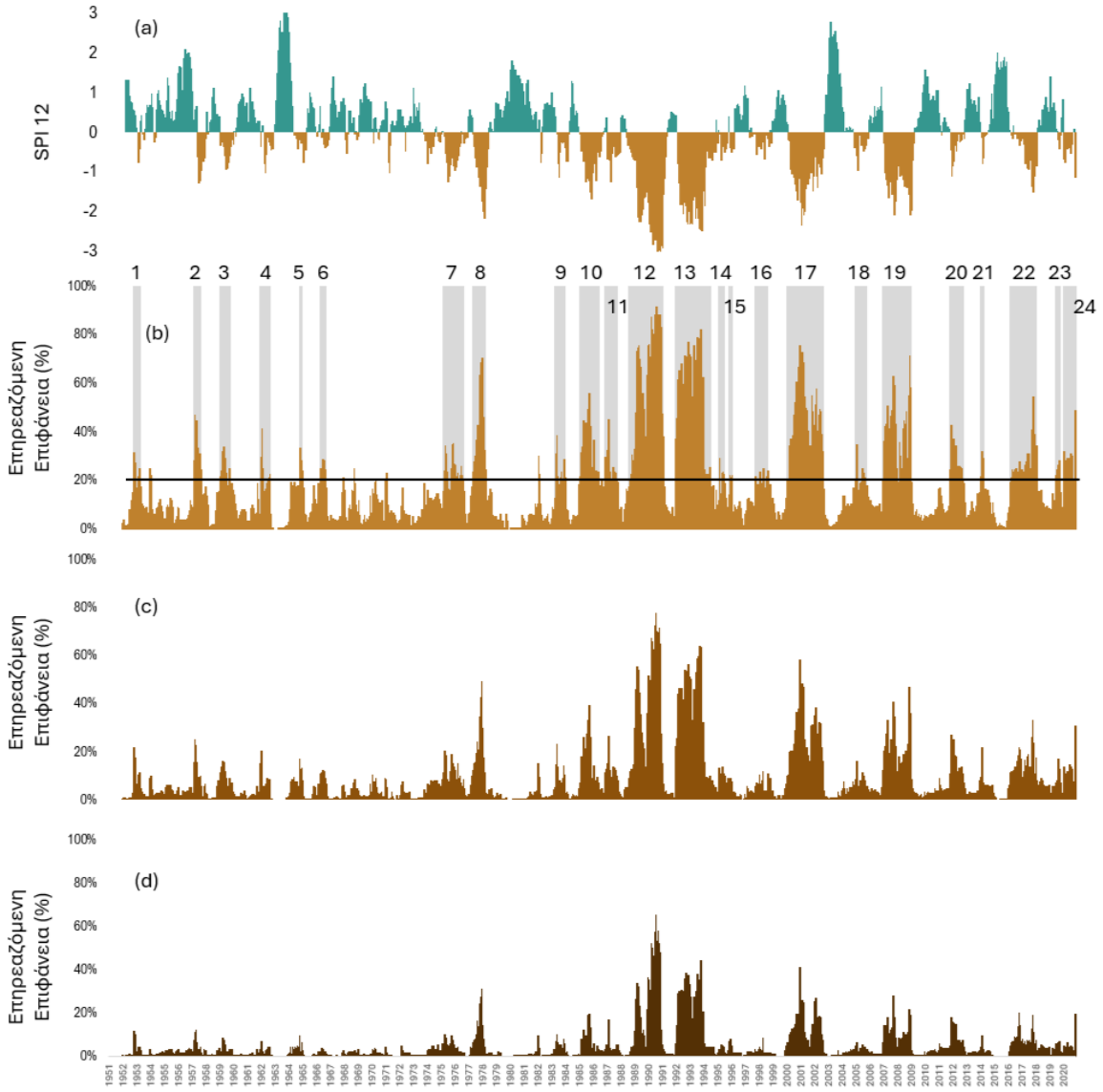
4.1 Χρονική εξέλιξη του SPI-12 και προσδιορισμός των γεγονότων ξηρασίας

Στο πρώτο στάδιο της ανάλυσης υπολογίστηκε η έκταση της ξηρασίας για κάθε μήνα της περιόδου 1951–2020, γεγονός που κατέστησε δυνατή την ταυτοποίηση των επιμέρους επεισοδίων ξηρασίας στον ελληνικό χώρο.

Για τη συνοπτική αποτύπωση των αποτελεσμάτων, οι τιμές της έκτασης ξηρασίας ανά μήνα καταχωρήθηκαν μαζί με τις αντίστοιχες χρονολογίες, δημιουργώντας το Διάγραμμα 4-1. Στο διάγραμμα αυτό, ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει το χρόνο (έτη), ενώ ο κατακόρυφος άξονας παρουσιάζει το ποσοστό της εδαφικής έκτασης της χώρας που βρέθηκε υπό συνθήκες ξηρασίας κάθε μήνα. Η γραφική αυτή απεικόνιση χρησιμοποιήθηκε για τον προκαταρκτικό εντοπισμό των κυριότερων επεισοδίων ξηρασίας και της σχετικής έντασής τους.

Το Διάγραμμα 4-1 απεικονίζει τη χρονική εξέλιξη της έκτασης της χώρας που επηρεάστηκε από συνθήκες ξηρασίας κατά την περίοδο 1951–2020, με βάση τον δείκτη SPI-12. Στο Διάγραμμα 4-1 εφαρμόζονται τρία διαφορετικά κατώφλια SPI: SPI ≤ –0.84 (b), SPI ≤ –1.28 (c) και SPI ≤ –1.65 (d), τα οποία αντιστοιχούν σε ήπια, μέτρια και έντονη ξηρασία, αντίστοιχα. Ακολουθώντας το προκαθορισμένο κριτήριο (>20% επηρεαζόμενης επιφάνειας για τουλάχιστον τρεις διαδοχικούς μήνες), εντοπίστηκαν συνολικά 24 επεισόδια ξηρασίας σε εθνικό επίπεδο. Τα επεισόδια αυτά κατανέμονται σε όλη την περίοδο μελέτης, καλύπτοντας συνολικά 307 μήνες, δηλαδή το 36,5% του συνολικού χρονικού διαστήματος των 70 ετών.

Από το Διάγραμμα 4-1 προκύπτει ότι, μετά την έναρξη της δεκαετίας του 1990, τα επεισόδια ξηρασίας παρουσιάζουν αυξημένη συχνότητα και ένταση. Ιδιαίτερα αξιοσημείωτα είναι τα επεισόδια με αύξοντα αριθμό 12, 13 και 17 (Πίνακας 4-1), τα οποία διακρίνονται για τη μεγάλη διάρκεια και έντασή τους. Συγκεκριμένα, τα επεισόδια αυτά αντιστοιχούν στις περιόδους: Αύγουστος 1988 – Ιανουάριος 1991 (Karamitsiou, 2015), Δεκέμβριος 1991 – Ιούνιος 1994 (Livada & Assimakopoulos, 2007), και Ιανουάριος 2000 – Αύγουστος 2002 (Tsouvalas, 2022).



Διάγραμμα 4-1:Εντοπισμός επεισοδίων ξηρασίας: χρονοσειρά του δείκτη SPI 12 μηνών για ολόκληρη την περιοχή μελέτης (a) χρονοσειρές του ποσοστού της περιοχής μελέτης που βρίσκεται υπό συνθήκες ξηρασίας σύμφωνα με διαφορετικά κατώφλια: SPI12 < –0,84 (b), SPI12 < –1,28 (c) και SPI12 < –1,65 (d). Η οριζόντια γραμμή στο 20% στο (b) υποδεικνύει το όριο που χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό των επεισοδίων ξηρασίας, τα οποία επισημαίνονται με γκρι σκίαση και αριθμούνται.

4.2 Χαρακτηρισμός γεγονότων ξηρασίας

Το διάγραμμα προσέφερε μια πρώτη συνολική εικόνα για τη χωροχρονική κατανομή των επεισοδίων ξηρασίας στην Ελλάδα. Ο Πίνακας 4-1 παρουσιάζει συγκεντρωτικά και πιο αναλυτικά από το διάγραμμα, τα βασικά στοιχεία των αναγνωρισμένων επεισοδίων, όπως η περίοδος έναρξης και λήξης, η εποχικότητα, η διάρκεια (σε μήνες), η μέση τιμή του δείκτη SPI-12, το ποσοστό της επηρεαζόμενης έκτασης, καθώς και η κατηγορία έντασης της ξηρασίας (ήπια, μέτρια ή έντονη).

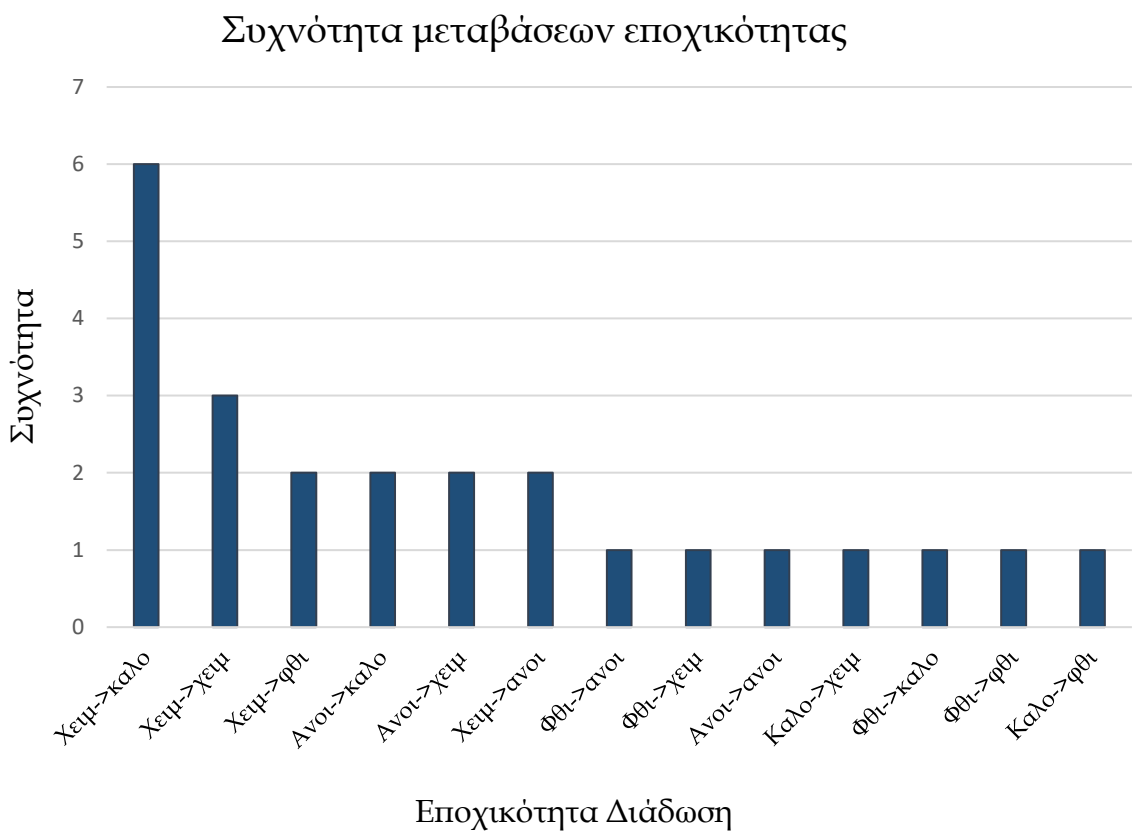
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάλυση της εποχικότητας των επεισοδίων ξηρασίας, όπως απεικονίζεται στα Διαγράμματα 4-2, 4-3 (a) και (b). Η πλειονότητα των επεισοδίων ξεκινάει κατά τη διάρκεια του χειμώνα (54,2%), ενώ μικρότερα ποσοστά καταγράφηκαν την άνοιξη (20,8%) και το φθινόπωρο (16,7%). Αντίθετα, μόλις το 8,3% των επεισοδίων είχε ως σημείο έναρξης το καλοκαίρι. Τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι η Ελλάδα είναι περισσότερο ευάλωτη στην εκδήλωση ξηρασιών κατά τους χειμερινούς μήνες.

Αναφορικά με τη λήξη των επεισοδίων, η κατανομή εμφανίζεται πιο ομαλή: το 37,5% των επεισοδίων τερμάτισε το καλοκαίρι, γεγονός περίεργο με βάση τα ξηρά καλοκαίρια που επικρατούν στην χώρα (Livada & Assimakopoulos, 2007). Το 29,1% των γεγονότων έληξαν τον χειμώνα, ενώ η άνοιξη και το φθινόπωρο συγκέντρωσαν από 16,7% έκαστοι. Η σύγκριση μεταξύ εποχικότητας έναρξης και λήξης αποκαλύπτει σημαντική μεταβλητότητα, ενισχύοντας την άποψη ότι η διάρκεια και η εξέλιξη των ξηρασιών δεν ακολουθούν συγκεκριμένο εποχικό πρότυπο.

Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι δεν καταγράφηκε κανένα επεισόδιο που να ξεκίνησε και να ολοκληρώθηκε εντός της θερινής περιόδου. Αντιθέτως, τα επεισόδια που ξεκίνησαν τον χειμώνα παρουσιάζουν μεγαλύτερη ποικιλομορφία, καθώς καταλήγουν σε οποιαδήποτε από τις τέσσερις εποχές του έτους.

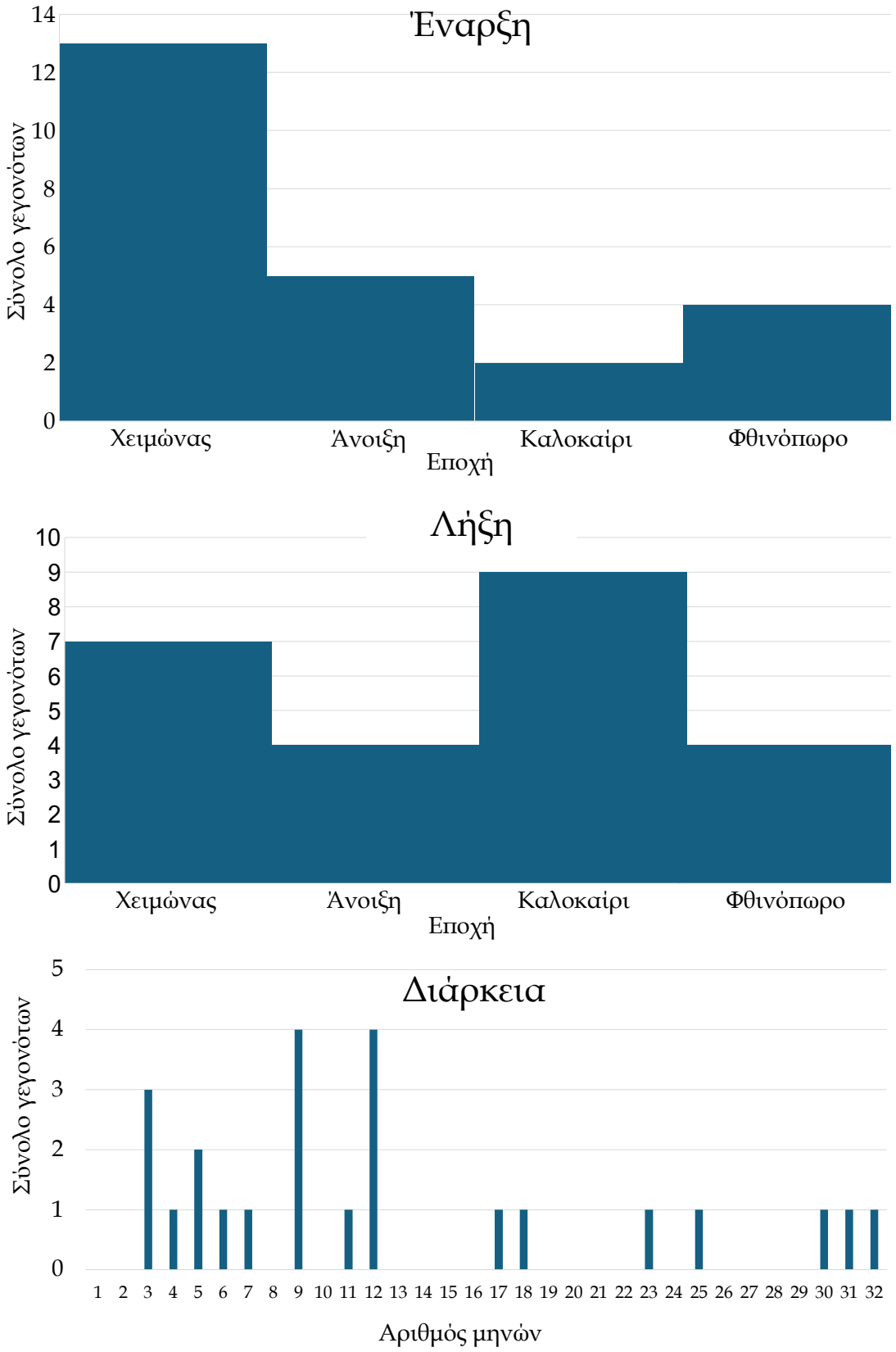
Πίνακας 4-1: Εντοπισμένα γεγονότα ξηρασίας και τα χαρακτηριστικά τους. Στον πίνακα αναγράφονται η έναρξη και η λήξη, η εποχικότητα, η διάρκεια σε μήνες, καθώς και η μέση ένταση και έκταση του κάθε γεγονότος. Επιπλέον, σημειώνεται η διάρκεια (μήνες) σε γεγονότα των οποίων η έκταση υπερέβη το 50% της συνολικής επιφάνειας της χώρας, και χαρακτηρίζεται η ένταση αυτών ως ήπια, μέτρια ή έντονη, βάσει των τιμών κατώφλι (0,84, 1,28, 1,65, αντίστοιχα).

Αρ. Γεγονότος	Διάρκεια	Εποχή	Αρ. Μηνών	Μέση Ένταση Ξηρασίας	Ποσοστό Έκτασης Ξηρασίας	Μήνες με έκταση > 50%		
						Ήπια (0,84)	Μέτρια (1,28)	Έντονη (1,65)
1	10/1952–03/1953	φθι – ανοι	6	-1,34	22,8%	–	–	–
2	02/1957–08/1957	χειμ – καλ	7	-1,38	34,1%	–	–	–
3	01/1959–09/1959	χειμ – φθι	9	-1,26	25,0%	–	–	–
4	12/1961–08/1962	χειμ – καλ	9	-1,32	23,5%	–	–	–
5	10/1964–12/1964	φθι – χειμ	3	-1,33	28,7%	–	–	–
6	04/1966–08/1966	ανοι – καλ	5	-1,32	25,8%	–	–	–
7	03/1975–08/1976	ανοι – καλ	18	-1,37	25,1%	–	–	–
8	**04/1977–03/1978**	**ανοι – ανοι**	**12**	**-1,46**	**41,5%**	**3**	–	–
9	04/1983–12/1983	ανοι – χειμ	9	-1,40	25,2%	–	–	–
10	01/1985–05/1986	χειμ – ανοι	17	-1,35	33,8%	**1**	–	–
11	11/1986–09/1987	χειμ – φθι	11	-1,37	26,5%	–	–	–
12	**08/1988–01/1991**	**καλ – χειμ**	**30**	**-1,59**	**63,1%**	**20**	**13**	**6**
13	**12/1991–06/1994**	**χειμ – καλ**	**31**	**-1,53**	**57,2%**	**23**	**10**	–
14	02/1995–06/1995	χειμ – καλ	5	-1,29	22,7%	–	–	–
15	11/1995–01/1996	χειμ – χειμ	3	-1,39	21,9%	–	–	–
16	09/1997–08/1998	φθι – καλ	12	-1,31	20,0%	–	–	–
17	**01/2000–08/2002**	**χειμ – καλ**	**32**	**-1,45**	**47,3%**	**11**	**1**	–
18	12/2004–08/2005	χειμ – καλ	9	-1,41	21,4%	–	–	–
19	**12/2006–12/2008**	**χειμ – χειμ**	**25**	**-1,42**	**42,6%**	**6**	–	–
20	10/2011–09/2012	φθι – φθι	12	-1,47	29,3%	–	–	–
21	01/2014–03/2014	χειμ – ανοι	3	-1,40	27,8%	–	–	–
22	**03/2016–01/2018**	**ανοι – χειμ**	**23**	**-1,56**	**28,2%**	**1**	–	–
23	06/2019–09/2019	καλ – φθι	4	-1,39	25,4%	–	–	–
24	01/2020–12/2020	χειμ – χειμ	12	-1,36	29,4%	–	–	–



Διάγραμμα 4-2: Εποχικότητες των 24ων γεγονότων ξηρασίας.

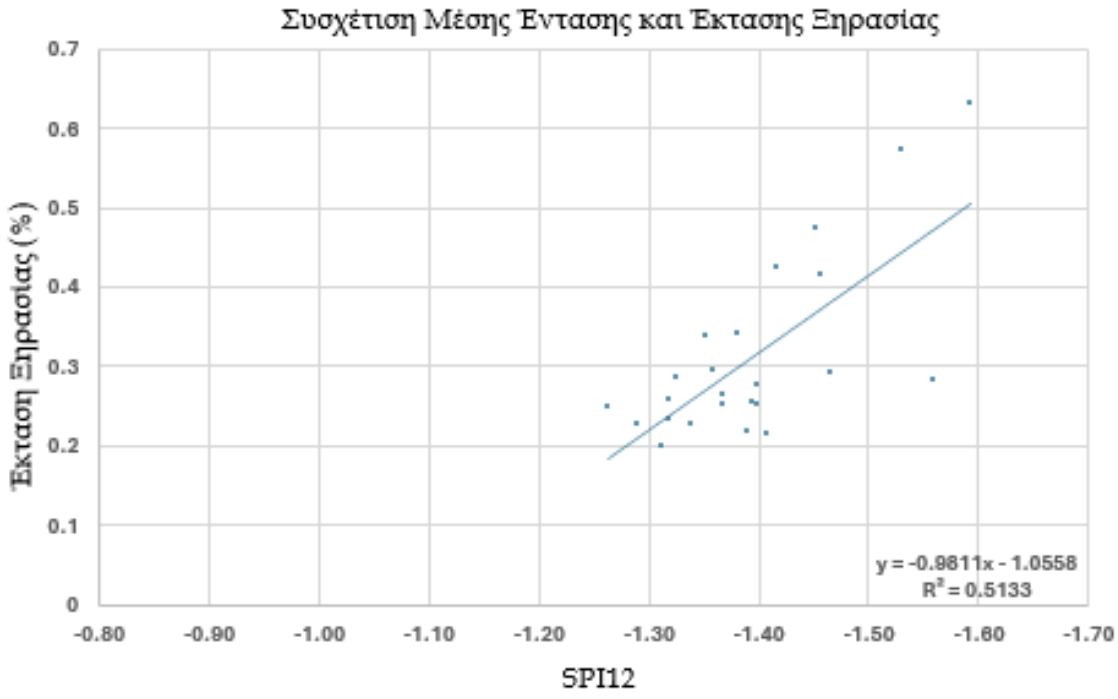
Με γνώμονα το Διάγραμμα 4-2 διαπιστώνεται ότι η συχνότερη μετάβαση εποχικότητας καταγράφηκε από τον χειμώνα προς το καλοκαίρι, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα παρατεταμένα επεισόδια ξηρασίας συχνά εκτείνονται και διατηρούνται κατά τη θερμή περίοδο του έτους. Στα Διαγράμματα 4-3 (a) και (b) η πλειονότητα των επεισοδίων ξηρασίας ξεκινά τον χειμώνα (54,2%), ενώ ως εποχή λήξης κυριαρχεί το καλοκαίρι (37,5%), γεγονός που καταδεικνύει την αυξημένη ευαλωτότητα της χώρας σε φαινόμενα μεγάλης διάρκειας με αφετηρία τη χειμερινή περίοδο.



Διάγραμμα 4-3 (a), (b) και (c) : Έναρξη, λήξη και διάρκεια των 24ων γεγονότων ξηρασίας.

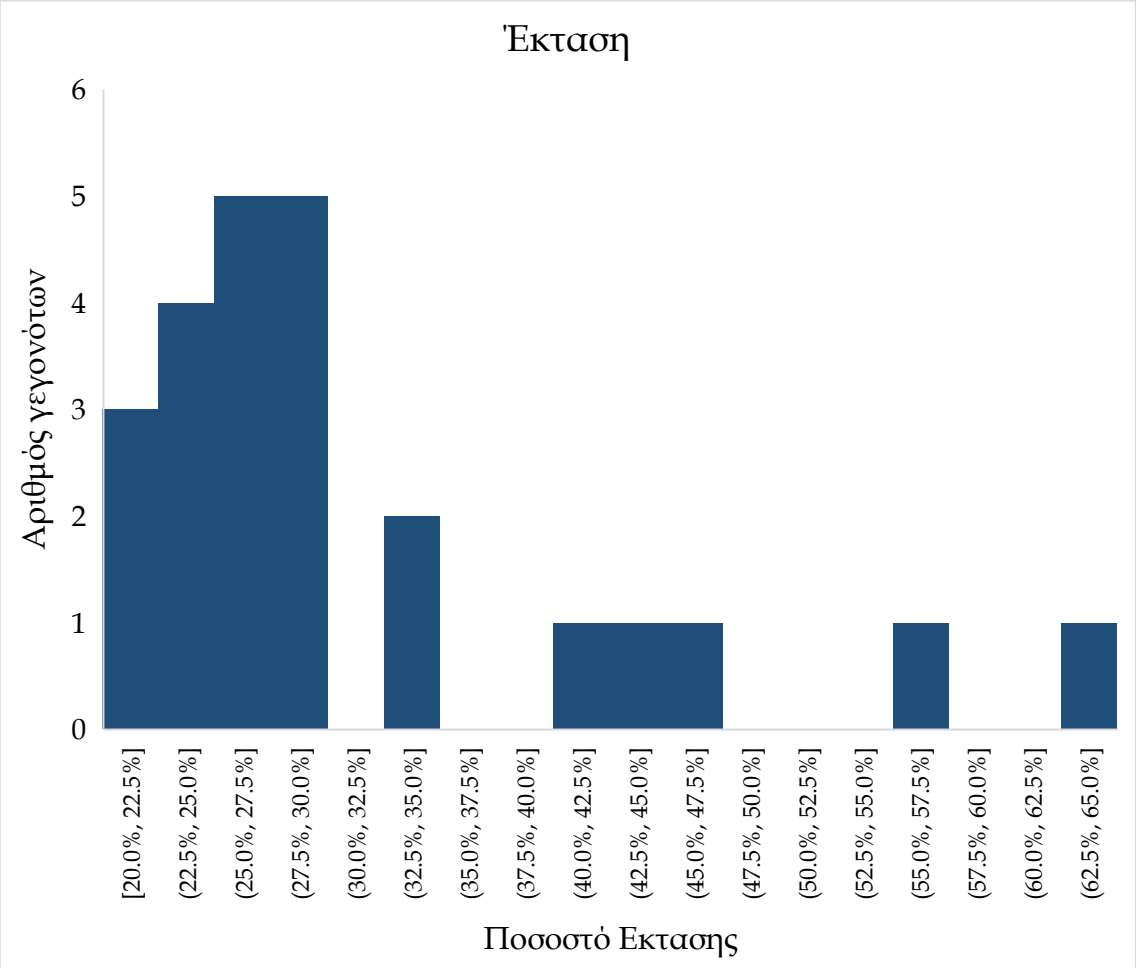
Σχετικά με τις παρατεταμένες ξηρασίες και την αντίστοιχη διάρκειά τους, υπάρχουν πέντε περιπτώσεις όπου οι ξηρασίες διήρκησαν περισσότερους από 20 μήνες Διάγραμμα 4-3 (c), δηλαδή το 21% των ξηρασιών. Από αυτά, 11 γεγονότα (το 46% των γεγονότων) είχαν διάρκεια μεγαλύτερη ή ίση των 12 μηνών. Συνεπώς, προκύπτει ότι ο ελλαδικός χώρος παρουσιάζει συχνά γεγονότα ξηρασίας μακράς διάρκειας, διότι σχεδόν ένα στα δύο έχει διάρκεια μεγαλύτερη ή ίση του ενός χρόνου. Τέλος, από τα αποτελέσματα δεν παρατηρείται άμεση συσχέτιση ανάμεσα στη διάρκεια των επεισοδίων ξηρασίας και τη στιγμή εμφάνισής τους.

Οι μεγαλύτερες περίοδοι ξηρασίας ήταν οι ξηρασίες (8/1988-1/1991) με 30 μήνες διάρκεια, η ξηρασία (12/1991-6/1994) με 31 μήνες διάρκεια και η ξηρασία του (1/2000-8/2002) με 32 μήνες διάρκεια. Η μέση έκταση της ξηρασίας για όλα τα γεγονότα είναι 31,18% και κυμαίνεται από ποσοστό 20,0% των πολύγωνων επιρροής (γεγονός 16) μέχρι και ποσοστό 63,1% (γεγονός 12). Η μέση έκταση της ξηρασίας δεν παρουσίασε κάποια συσχέτιση με την διάρκεια κάθε επεισοδίου ξηρασίας. Όμως, το Διάγραμμα 4-4, υποδεικνύει μια θετική σχέση (συντελεστής συσχέτισης R^2 = 0.513) μεταξύ της έντασης μιας ξηρασίας και της επηρεαζόμενης έκτασης. Αυτό σημαίνει πως όσο πιο έντονη είναι η ξηρασία (δηλαδή όσο χαμηλότερη είναι η τιμή του SPI-12), τόσο μεγαλύτερη περιοχή καλύπτει. Συνεπώς, οι ισχυρές ξηρασίες δεν παραμένουν τοπικές, αλλά εξαπλώνονται και επηρεάζουν μεγάλα τμήματα της περιοχής.

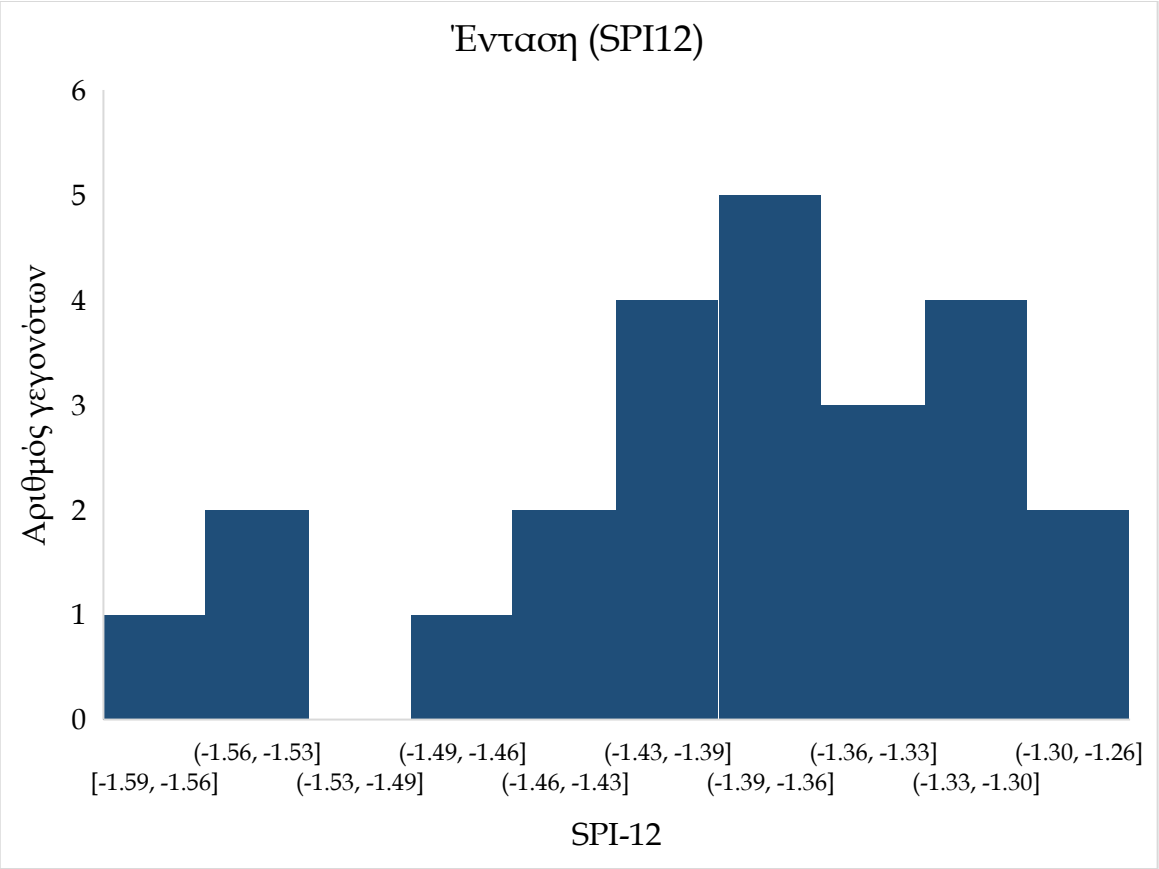


Διάγραμμα 4-4: Συσχέτιση μεταξύ μέσης έντασης και έκτασης των 24 γεγονότων ξηρασίας.

Σε δύο μόνο περιπτώσεις η περιοχή που επηρεάστηκε από συνθήκες ξηρασίας ξεπέρασε το 50% των πολύγωνων επιρροής και πέντε γεγονότα ξεπέρασαν το 40% γεγονός που αποτυπώνεται και στο Διάγραμμα 4-5, παρακάτω. Ουσιαστικά είχαμε πέντε περιπτώσεις όπου το 40% της χώρας βρίσκονταν υπό συνθήκες ξηρασίας. Η συνολική ένταση των γεγονότων ξηρασίας προέκυψε από τον μέσο όρο των SPI-12 για κάθε γεγονός ξηρασίας που καταγράφηκε, Διάγραμμα 4-6 παρακάτω. Τα γεγονότα 12 και 13 κατατάσσονται μεταξύ των πιο έντονων, με μέσες τιμές SPI-12 –1,59 και –1,53 αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4-5: Μέση έκταση των 24ων γεγονότων ξηρασίας.



Διάγραμμα 4-6: Μέση ένταση των 24ων γεγονότων ξηρασίας.

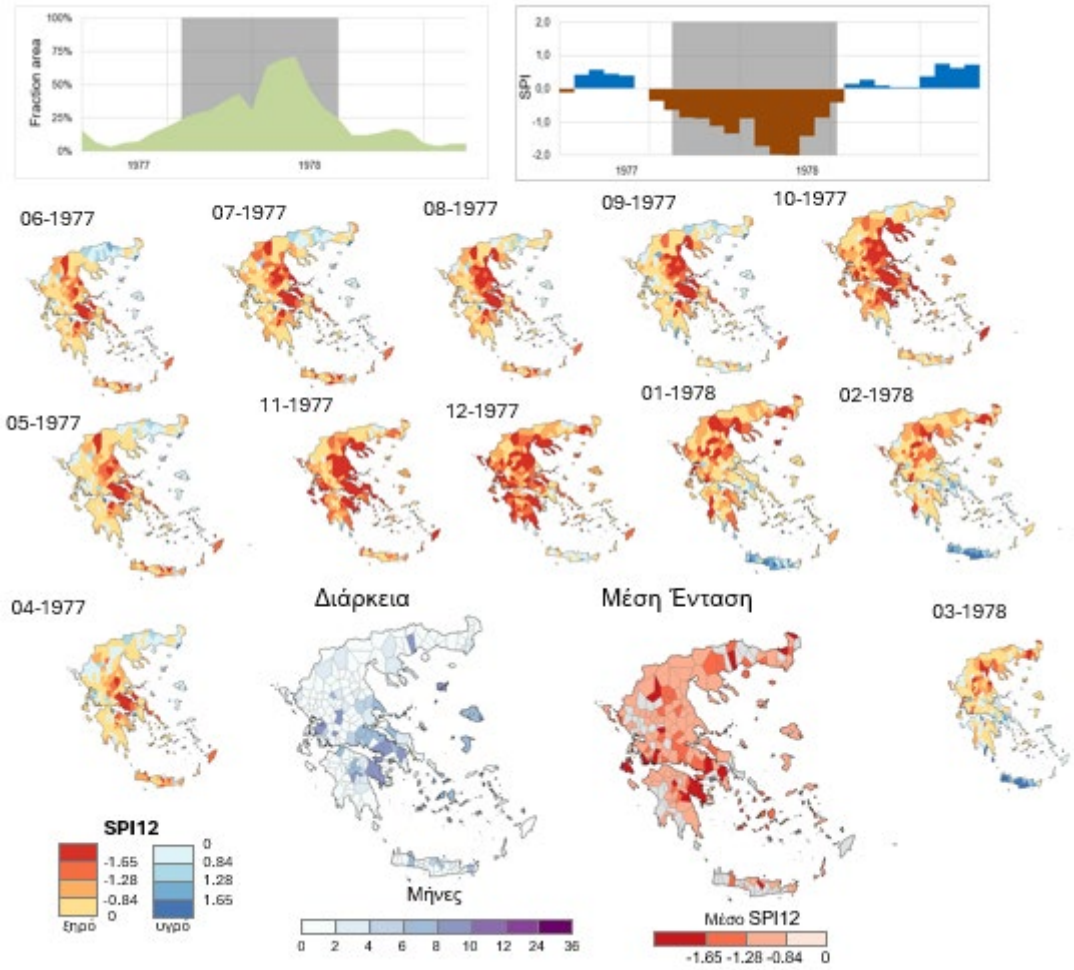
4.3 Ανάλυση γεγονότων ξηρασίας

Από τα 24 καταγεγραμμένα επεισόδια, έξι (8, 12, 13, 17, 19, 22) κρίθηκαν ως τα σημαντικότερα, βάσει της διάρκειας, της μέσης έντασης (SPI-12) και της μέσης επηρεαζόμενης έκτασης της ξηρασίας στην περιοχή του εκάστοτε γεγονότος. Η ανάλυση των υπόλοιπων γεγονότων, καθώς και τα αντίστοιχα διαγράμματα, βρίσκονται στα παραρτήματα.

Γεγονός ξηρασίας 8 (04/1977–3/1978)

Το όγδοο γεγονός ξηρασίας που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4-7, είχε χρονική διαφορά 8 μηνών από το τελευταίο γεγονός ξηρασίας, με διάρκεια ενός έτους (04/1977 – 3/1978). Επιπλέον η έκταση της ξηρασίας ήταν 41,5% άρα ήταν εμφανώς εκτεταμένη. Η μέση ένταση των τιμών SPI-12 ήταν -1,46 άρα ήταν ένα έντονο συμβάν ξηρασίας. Η έκταση και η ένταση του επεισοδίου βρίσκουν αντιστοιχία και στη μελέτη του μελέτης του (Καραμπουρνιώτης, 2012).

Η σταδιακή ενίσχυση της έντασης στο δεύτερο μισό της περιόδου και η μετατόπιση του επίκεντρου της ξηρασίας από τη Θεσσαλία προς τη Μακεδονία υποδηλώνουν δυναμική εξέλιξη του φαινομένου και επιβεβαιώνουν τη χωρική αστάθεια που συχνά συνοδεύει τα επεισόδια ξηρασίας στην Ελλάδα (Tigkas, 2008).

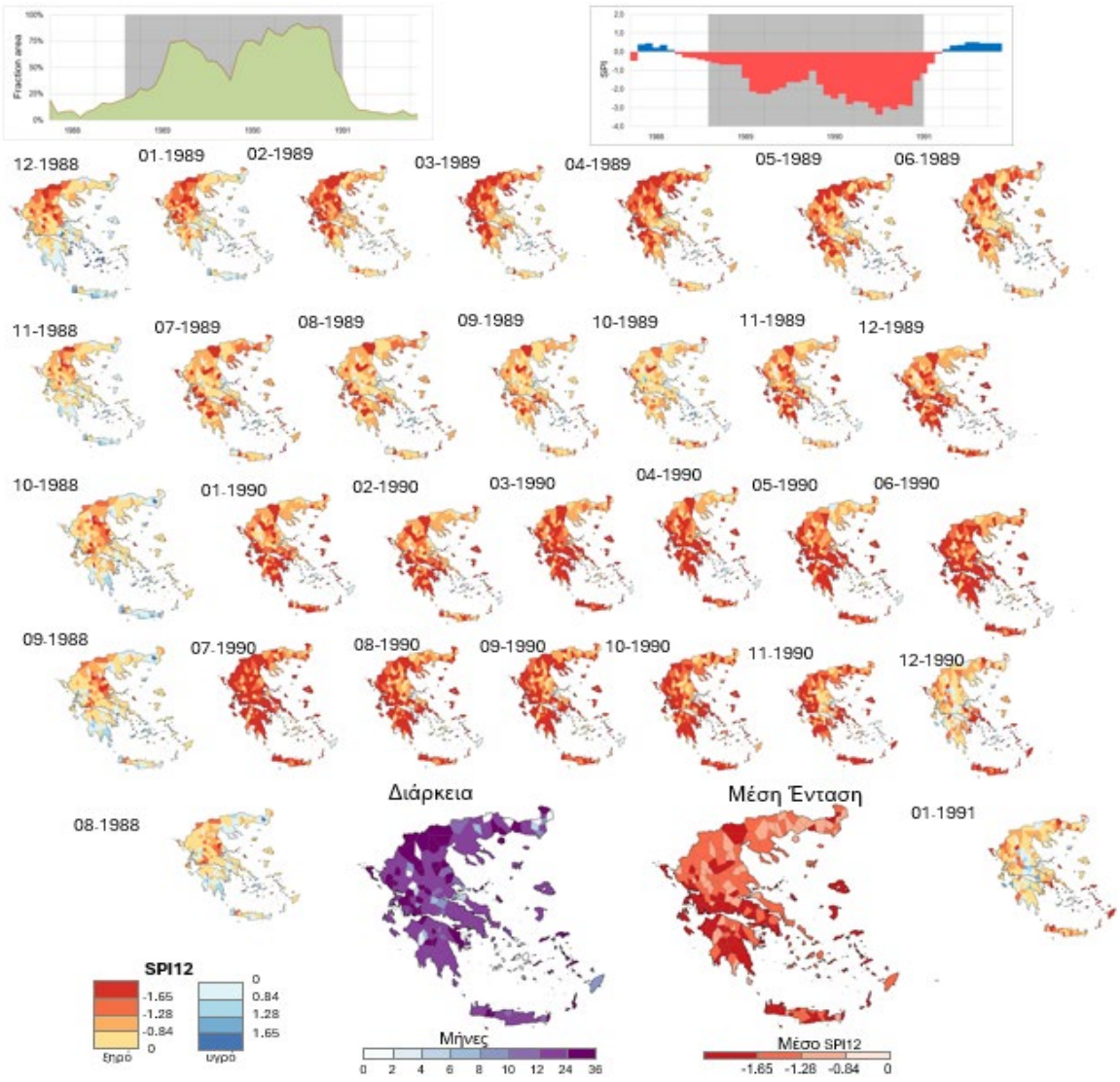


Διάγραμμα 4-7 : Ανάλυση γεγονότος 8 (04/1977–3/1978).

Γεγονός ξηρασίας 12 (8/1988-1/1991)

Το δωδέκατο γεγονός ξηρασίας παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 4-8. Είχε χρονική διαφορά 1 χρόνο από το τελευταίο γεγονός ξηρασίας, και την μεγάλη διάρκεια των 30 μηνών (8/1988- 1/1991). Η έκταση της ξηρασίας ήταν 63,1%, η μεγαλύτερη της μελέτης, φανερώνοντας την κλιματική πίεση που άσκησε σε ευρείες γεωγραφικές περιοχές. Η ένταση του ήταν -1,59 SPI-12 κατατάσσοντας το, ως επεισόδιο έντονης έντασης με βάση τα επιστημονικά όρια χαρακτηρισμού(McKee et al., 1993). Το γεγονός ξηρασίας επαληθεύεται και σε πίνακες της μελέτης των (Karamitsiou, 2015).

Είναι δύσκολο να προσδιοριστεί που εκδηλώθηκε κυρίως καθώς κάλυψε όλη την Ελλάδα, γεγονός αναμενόμενο διότι μεγάλα επεισόδια ξηρασίας χαρακτηρίζονται από μεγάλη γεωγραφική εξάπλωση και όχι περιορισμένη εμφάνιση (Trullenque-Blanco et al., 2024). Προς την λήξη του έφτασε το απόγειο της μέγιστης έντασης του.

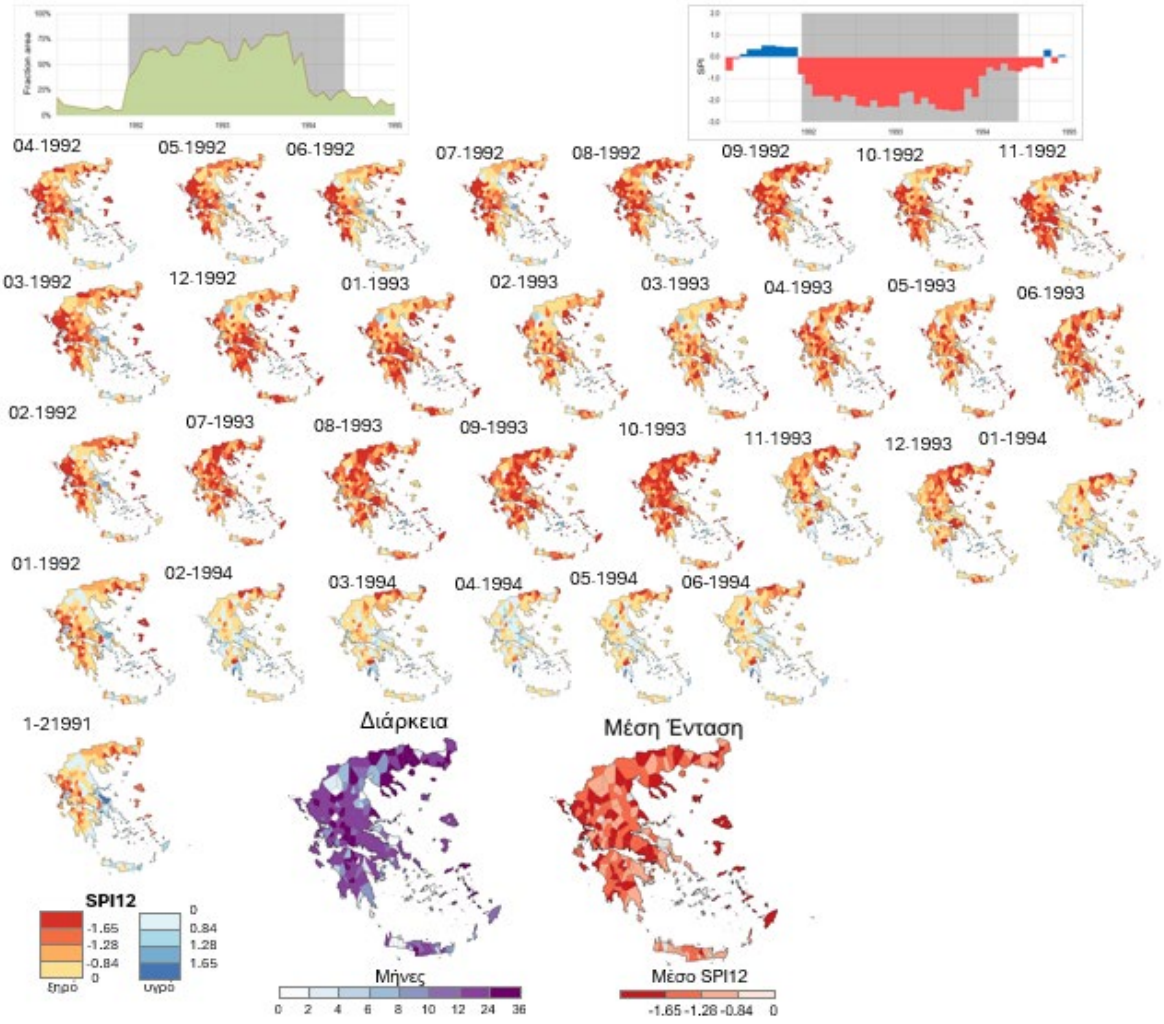


Διάγραμμα 4-8: Ανάλυση γεγονότος 12 (8/1988-1/1991).

Γεγονός ξηρασίας 13 (12/1991-6/1994)

Το δέκατο τρίτο γεγονός ξηρασίας παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 4-9. Είχε χρονική διαφορά λίγο λιγότερο από 1 χρόνο από το τελευταίο γεγονός. Είναι ένα έντονο γεγονός όπως και το προηγούμενο. Άρα πρόκειται μάλλον για μια αλυσιδωτή περίοδο ακραίων ξηρασιών. Είχε την διάρκεια των 31 μηνών (12/1991-6/1994) και η έκταση του ήταν 57,2%, φανερώνοντας την κλιματική πίεση που άσκησε σε ευρείες γεωγραφικές περιοχές. Τέλος η ένταση του ήταν -1,53 SPI-12, έτσι χαρακτηρίζεται έντονη. Η έκταση και η ένταση του επεισοδίου βρίσκουν αντιστοιχία και στη μελέτη των (Livada & Assimakopoulos, 2007).

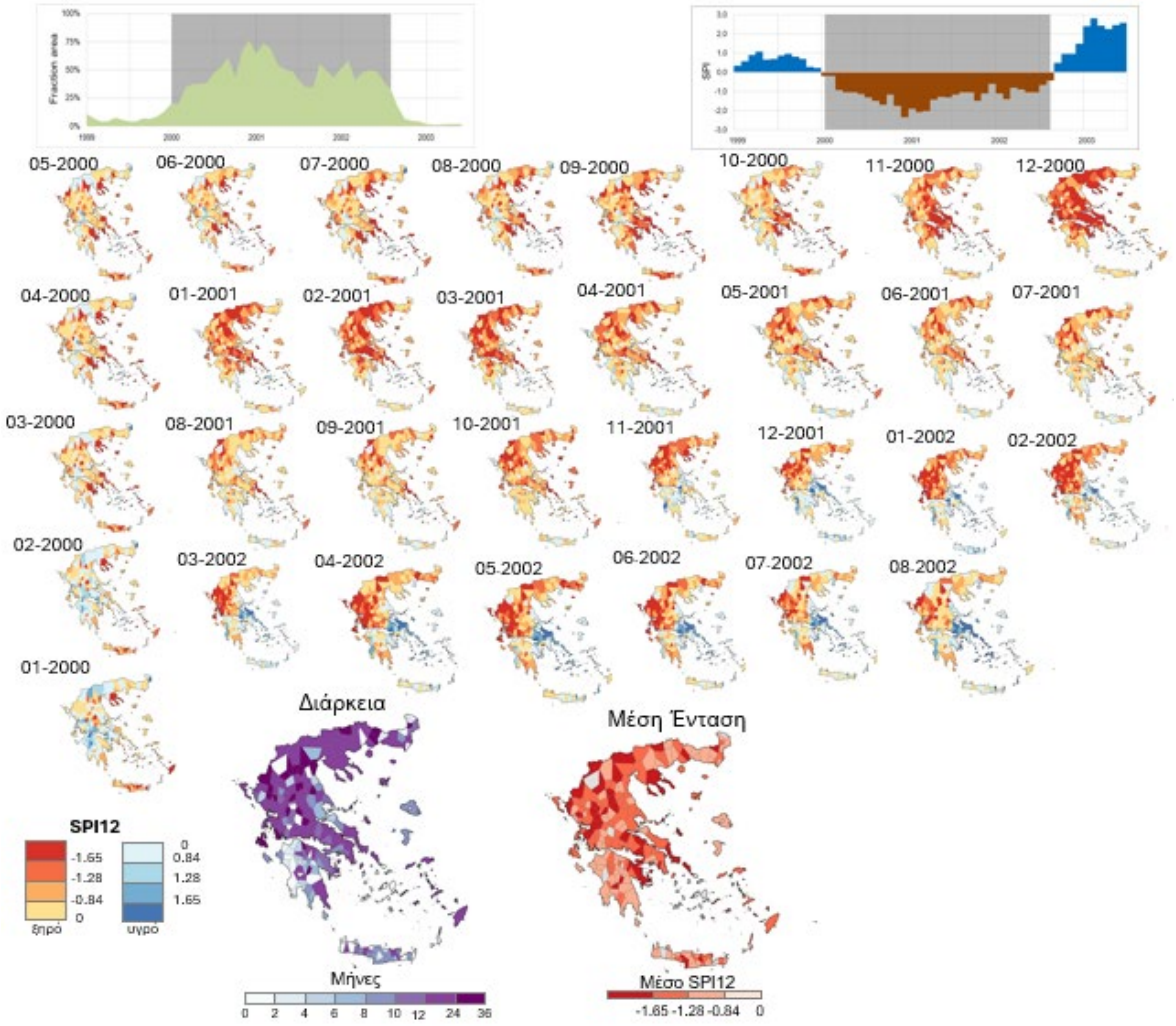
Είναι δύσκολο να προσδιοριστεί που εκδηλώθηκε κυρίως, καθώς κάλυψε όλη την Ελλάδα. Τους τελευταίους έξι μήνες της διάρκειας του, άρχισε να μειώνεται αρκετά η ένταση και το μέγεθος του διότι υπάρχει σαφής σύνδεση και αλληλεξάρτηση μεταξύ των δύο μεγεθών(Mathbout et al., 2021).



Διάγραμμα 4-9: Ανάλυση γεγονότος 13 (12/1991-6/1994).

Γεγονός ξηρασίας 17 (1/2000-8/2002)

Το δέκατο έβδομο γεγονός ξηρασίας παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 4-10. Είχε χρονική διαφορά σχεδόν 1,5 χρόνο από το τελευταίο γεγονός. Διήρκησε 32 μήνες (1/2000-8/2002), επιβεβαιώνοντας την αυξημένη επιμονή τέτοιων φαινομένων στην Ελλάδα κατά τις αρχές του 21ου αιώνα, όπως έχει επισημανθεί και από τους (Politi et al., 2022). Αν και η μέση ένταση του φαινομένου -1,45 SPI-12 δεν αποτελεί ιδιαίτερα έντονη ξηρασία, η μεγάλη διάρκειά του σε συνδυασμό με τη σημαντική χωρική κάλυψη (47,3%), το καθιστούν ένα επεισόδιο ιδιαίτερης σημασίας ως προς τις αθροιστικές του επιπτώσεις. Η έκταση και η ένταση του επεισοδίου βρίσκουν αντιστοιχία και στη μελέτη των (Kalamaras et al., 2010)
Το γεγονός ότι η μέγιστη ένταση εμφανίζεται προς την αρχή υποδηλώνει έναν διαφορετικό εξελικτικό ρυθμό σε σύγκριση με άλλες ξηρασίες της μελέτης, αποδεικνύοντας ότι η διακύμανση της έντασης δεν είναι απαραίτητα γραμμική(Vogel et al., 2021).

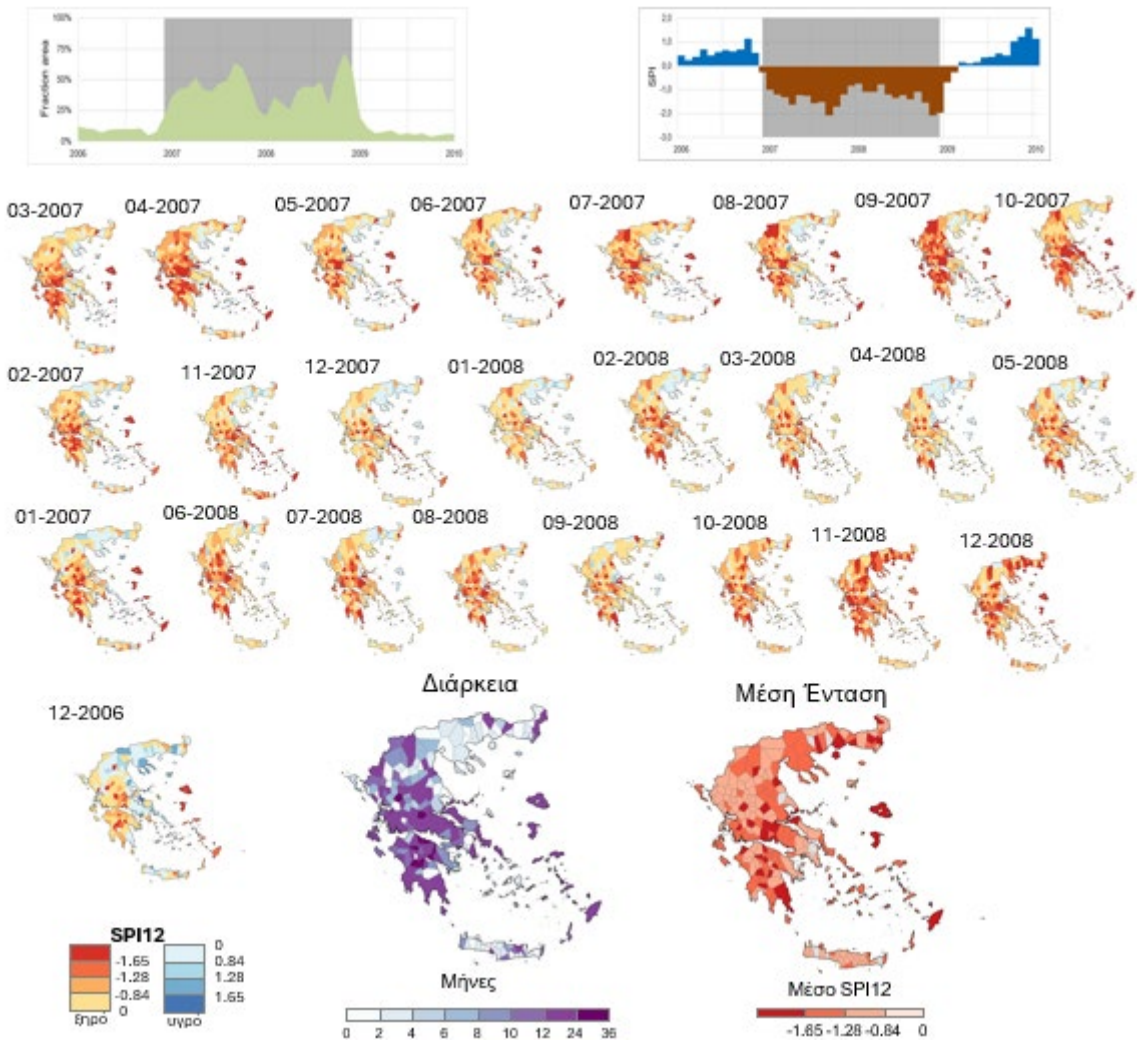


Διάγραμμα 4-10: Ανάλυση γεγονότος 17 (1/2000-8/2002).

Γεγονός ξηρασίας 19 (12/2006-12/2008)

Το δέκατο ένατο γεγονός ξηρασίας παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 4-11 και είχε χρονική διαφορά 1,5 περίπου από το τελευταίο γεγονός ξηρασίας. Διήρκησε 25 μήνες (12/2006-12/2008). Η μέση ένταση των τιμών SPI-12 ήταν -1,42, άρα γεγονός έντονης έντασης, που όμως η μεγάλη διάρκειά του σε συνδυασμό με τη σημαντική χωρική κάλυψη (42,6%), το καθιστούν ένα επεισόδιο ιδιαίτερης σημασίας ως προς τις αθροιστικές του επιπτώσεις. Το παρόν γεγονός ξηρασίας αναφέρεται και σε πίνακες της μελέτης των (Tsesmelis et al., 2022).

Το μέγεθος της έντασης του, εκδηλώθηκε στην εκκίνηση και στη λήξη του και λιγότερο στην μέση της διάρκειας του όπου και μειώθηκε, καθώς με βάση τους (Karamitsiou, 2015) η ένταση παρουσιάζει αυξομειώσεις που εξαρτώνται από τη χρονική κλίμακα και την περιοχή μελέτης. Στην παρούσα ξηρασία νοτιοδυτική Πελοπόννησος, η ανατολική Θράκη και η Αττική επηρεάστηκαν περισσότερο.

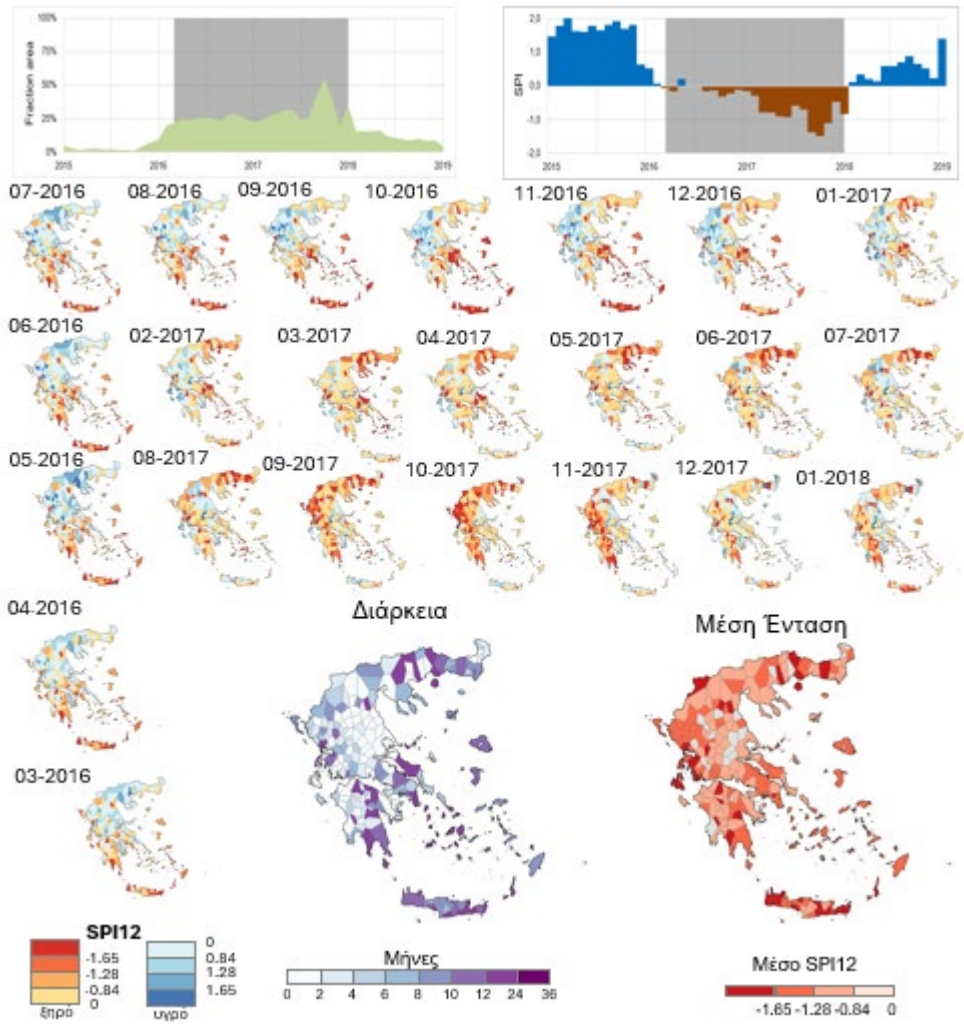


Διάγραμμα 4-11: Ανάλυση γεγονότος 19 (12/2006-12/2008).

Γεγονός ξηρασίας 22 (3/2016-1/2018)

Το εικοστό δεύτερο γεγονός ξηρασίας παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 4-12, είχε χρονική απόσταση 2 χρόνια από το τελευταίο γεγονός ξηρασίας. Είχε την διάρκεια των 23 μηνών (3/2016-1/2018). Η ένταση του ήταν -1,56 SPI-12, άρα μπορεί να θεωρηθεί ως έντονο γεγονός ξηρασίας, παρά την σχετικά μικρή έκταση ξηρασίας 28,2%. Το παραπάνω γεγονός ξηρασίας αναφέρεται και στην μελέτη της (Ligkoni, 2021) που εστιάζει στις ξηρασίες στην Ελλάδα και πώς αυτές είναι αλληλένδετες με μεγάλες πυρκαγιές.

Το παρόν φαινόμενο επηρέασε πολλά μέρη της Ελλάδας κυρίως όμως την Θράκη και την Κρήτη. Η μέγιστη ένταση του εκδηλώθηκε προς την λήξη του ενώ στο πρώτο μισό της διάρκειας του είχε αμελητέα ένταση ελάχιστα κάτω από το συνηθισμένο τόσο ώστε να θεωρηθεί απλά ως γεγονός ξηρασίας. Με γνώμονα τις παραπάνω διαπιστώσεις υποδηλώνεται η δυναμική εξέλιξη του φαινομένου και η χωρική αστάθεια που συχνά συνοδεύει τα επεισόδια ξηρασίας στην Ελλάδα (Tigkas, 2008).



Διάγραμμα 4-12: Ανάλυση γεγονότος 22 (3/2016-1/2018).

5

Συμπεράσματα

5.1 Κύρια συμπεράσματα και προστιθέμενη αξία της εργασίας

Η παραπάνω μελέτη αποτελεί μια εκτενή ανασκόπηση πάνω στα γεγονότα ξηρασίας στον Ελλαδικό χώρο από το 1950 μέχρι και το 2020. Με βάση την μελέτη ήρθε η στιγμή για τον απολογισμό των συνολικών αποτελεσμάτων που εξήχθησαν και την ανάλυση τους για την σημαντικότητα που φέρουν για την σύγχρονη κλιματική πραγματικότητα της χώρας. Αθροιστικά τα γεγονότα ξηρασίας ήταν 24, η συνολική τους διάρκεια ήταν 307 μήνες ξηρασίας ή 25,6 χρόνια. Άρα από τα 70 χρόνια που η παρούσα μελέτη διερευνά για γεγονότα ξηρασίας στην Ελλάδα, το 36,5% αφορούσε έτη ξηρασίας. Η μέση διάρκεια των καταγεγραμμένων επεισοδίων ξηρασίας είναι περίπου 12,8 μήνες, με 46% των φαινομένων να έχουν διάρκεια μεγαλύτερη ή ίση του έτους. Παρατηρώντας το Διάγραμμα 4-1 στα αποτελέσματα παραπάνω ή πιο αναλυτικά βλέποντας την απόσταση του τελευταίου γεγονότος ξηρασίας από το επόμενο παρατηρείται μια σαφή μείωση της χρονικής διάρκειας χωρίς ξηρασίας, καθώς φαίνεται τα γεγονότα ξηρασίας να πληθαίνουν με την πάροδο του χρόνου προς το σήμερα.

Εκτός της διάρκειας σημαντική παράμετρος για τον προσδιορισμό των ξηρασιών αποτελεί και η ένταση. Ο μέσος όρος των εντάσεων και των εικοστεσσάρων γεγονότων ήταν -1,39 SPI-12. Κατατάσσεται με βάση τα επιστημονικά όρια χαρακτηρισμού(McKee et al., 1993) ως ένας σχετικά έντονος μέσος όρος εντάσεων. Το SPI-12 κυμαίνονταν από -1,26 που ήταν και η μικρότερη τιμή έως και -1,59 που ήταν η μεγαλύτερη. Γεγονός ανησυχητικό καθώς των εικοστεσσάρων γεγονότων οι επιπτώσεις ήταν υπολογίσιμες.

Μελετώντας τον δείκτη της έκτασης, ο συνολικός μέσος όρος των εκτάσεων ξηρασίας για όλα τα γεγονότα ήταν 31,18%. Η έκταση εμφάνισε σχετικά μικρές διακυμάνσεις μεταξύ των γεγονότων, καθώς πέντε γεγονότα ξεπέρασαν το 40% των πολύγωνων επιρροής.

Άξιο αναφοράς είναι ότι εκ των 24 γεγονότων ξηρασίας, η πλειονότητα των επεισοδίων ξεκίνησε τον χειμώνα (54,2%), ενώ ως εποχή λήξης που κυριαρχεί είναι το καλοκαίρι (37,5%), γεγονός που καταδεικνύει την αυξημένη ευαλωτότητα της χώρας σε φαινόμενα μεγάλης διάρκειας με αφετηρία τη χειμερινή περίοδο και πιθανή λήξη τους το καλοκαίρι.

Η τελευταία παράμετρος ώστε να ολοκληρωθεί ο χαρακτηρισμός ενός επεισοδίου ξηρασίας είναι η ποσοτικοποιημένη αύξηση της γεωγραφικής έκτασης της Ελλάδας που επηρεάζεται από ξηρασία, ανά κατηγορία έντασης, κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου. Ειδικότερα, η έκταση της χώρας που κάθε δεκαετία εμφανίζει συνθήκες ήπιας ξηρασίας (SPI < –0.84) αυξάνεται κατά 2,06%, δηλαδή κατά περίπου 2724 τετραγωνικά χιλιόμετρα – έκταση που υπερβαίνει την επιφάνεια του Νομού Χανίων (2376 τ.χλμ.). Αντίστοιχα, η

έκταση υπό συνθήκες μέτριας ξηρασίας (SPI < –1.28) αυξάνεται κατά 1,41% ανά δεκαετία, δηλαδή περίπου 1856 τ.χλμ., ενώ η έκταση που πλήττεται από έντονη ξηρασία (SPI < –1.65) αυξάνεται με ρυθμό 0,86% ανά δεκαετία, που αντιστοιχεί σε περίπου 1130 τετραγωνικά χιλιόμετρα. Οι αυξήσεις αυτές υποδεικνύουν μια σταθερή γεωγραφική εξάπλωση του φαινομένου, με ιδιαίτερη σημασία για τον σχεδιασμό μέτρων πρόληψης και προσαρμογής στην κλιματική μεταβλητότητα. Η τεκμηρίωση αυτών των χωρικών μεταβολών, σε συνδυασμό με τον χρονικό εντοπισμό των επεισοδίων ξηρασίας, συνιστά μια από τις κύριες συνεισφορές της εργασίας.

Στην παρούσα έρευνα, όλα τα γεγονότα είχαν την σημασία τους και συνέβαλαν στο φαινόμενο της ξηρασίας στην Ελλάδα ωστόσο, 6 εξ αυτών ξεχώρισαν εξαιτίας των χαρακτηριστικών τους και σηματοδότησαν τον ελλαδικό χώρο είναι τα 6 που αναλύθηκαν στα αποτελέσματα. Τα γεγονότα 8,12,13,17,19 και 22 τα οποία υπερείχαν σε ένταση, έκταση και διάρκεια έναντι των υπολοίπων.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν λοιπόν από αυτή την έρευνα και την ανάλυση των αποτελεσμάτων είναι ότι τα φαινόμενα ξηρασίας στην Ελλάδα με την πάροδο του χρόνου εμφανίζουν αυξητική τάση σε συχνότητα και μεγαλώνουν και σε διάρκεια. Επίσης, και η έντασή τους παρουσιάζει μια μικρή ανοδικότητα. Τέλος έκταση του φαινομένου υπέδειξε μια σταθερή γεωγραφική εξάπλωση του. Άρα, με βάση τα υπάρχοντα αποτελέσματα, μια μελλοντική πρόβλεψη είναι ότι τα επεισόδια ξηρασίας θα συνεχίσουν να πληθαίνουν με την πάροδο των χρόνων και θα απασχολούν την επιστημονική κοινότητα όλο και περισσότερο. Γι’ αυτό χρειάζεται να δοθεί η πρέπουσα προσοχή όχι μόνο για την περιοχή της Ελλάδας και της Μεσογείου αλλά και για τον υπόλοιπο πλανήτη.

Η παρούσα μελέτη συμβάλλει στην ενίσχυση της κατανόησης των χωροχρονικών χαρακτηριστικών των μετεωρολογικών ξηρασιών στην Ελλάδα, χρησιμοποιώντας δεδομένα 70 ετών και τον δείκτη SPI-12. Η μελέτη αποτελεί λοιπόν έναν Άτλας ξηρασίας για την χώρα (1950–2020), παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με την εμφάνιση, τις επιπτώσεις και τους κινδύνους των ξηρασιών στην Ελλάδα. Τα αποτελέσματά της μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο για την ανάπτυξη στρατηγικών πρόληψης και διαχείρισης υδάτινων πόρων, ενισχύοντας την ικανότητα πρόβλεψης και αντιμετώπισης των επιπτώσεων της ξηρασίας.

5.2 Περιορισμοί της εργασίας

Παρόλο που η παρούσα έρευνα είναι άρτια και ολοκληρωμένη, επιδέχεται επιστημονικής βελτίωσης. Επικεντρώνεται στην ανάλυση ξηρασιών στην Ελλάδα για την περίοδο 1950–2020 με τη χρήση του δείκτη SPI-12. Για τη βελτίωση της ανάλυσης προτείνεται η ενσωμάτωση επιπλέον δεικτών, όπως ο SPEI, που λαμβάνει υπόψη τη θερμοκρασία, και ο PDSI, που αξιολογεί την υγρασία του εδάφους, ιδιαίτερα χρήσιμος για αγροτικές περιοχές. Παράλληλα, η επέκταση της περιόδου μελέτης έως το 2025 θα επέτρεπε τη σύγκριση με τα πιο πρόσφατα δεδομένα και την εκτίμηση της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής.

5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Τέλος, προτείνεται η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων αυτής της μελέτης για τη διαμόρφωση πολιτικών διαχείρισης υδάτινων πόρων και την ενίσχυση των συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης ξηρασίας. Μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν να εστιάσουν στην ολοκληρωμένη αποτίμηση των επιπτώσεων της ξηρασίας σε διαφορετικούς τομείς, όπως η γεωργία, η ενέργεια και τα οικοσυστήματα, καθώς και στην ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης με χρήση σύγχρονων τεχνικών μηχανικής μάθησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Agnew, C. T. (2000). Using the SPI to Identify Drought.

Asadi Zarch, M. A., Sivakumar, B., & Sharma, A. (2015). Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI). Journal of Hydrology, 526, 183–195. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.071

Belayneh, A., Adamowski, J., Khalil, B., & Ozga-Zielinski, B. (2014). Long-term SPI drought forecasting in the Awash River Basin in Ethiopia using wavelet neural network and wavelet support vector regression models. Journal of Hydrology, 508, 418–429. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.052

Brassel, K. E., & Reif, D. (1979). A Procedure to Generate Thiessen Polygons. Geographical Analysis, 11(3), 289–303. https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1979.tb00695.x

Canton, H. (2021). The Europa Directory of International Organizations 2021 (23rd ed.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781003179900

Cody, M. L., & Mooney, H. A. (1978). Convergence Versus Nonconvergence in Mediterranean-Climate Ecosystems. Annual Review of Ecology and Systematics, 9(1), 265–321. https://doi.org/10.1146/annurev.es.09.110178.001405

David Todd. (2005). GROUNDWATERHYDROLOGY-TODD.

Eshel, G., & Farrell, B. F. (2000). Mechanisms of Eastern Mediterranean Rainfall Variability. Journal of the Atmospheric Sciences, 57(19), 3219–3232. https://doi.org/10.1175/1520-0469(2000)057<3219:MOEMRV>2.0.CO;2

Giannakopoulos, C., Kostopoulou, E., Varotsos, K. V., Tziotziou, K., & Plitharas, A. (2011). An integrated assessment of climate change impacts for Greece in the near future. Regional Environmental Change, 11(4), 829–843. https://doi.org/10.1007/s10113-011-0219-8

Gomez-Gomez, J.-D., Pulido-Velazquez, D., Collados-Lara, A.-J., & Fernandez-Chacon, F. (2022). The impact of climate change scenarios on droughts and their propagation in an arid Mediterranean basin. A useful approach for planning adaptation strategies. Science of The Total Environment, 820, 153128. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153128

Goodman, N. R. (1963). Statistical Analysis Based on a Certain Multivariate Complex Gaussian Distribution (An Introduction). The Annals of Mathematical Statistics, 34(1), 152–177. https://doi.org/10.1214/aoms/1177704250

Hertig, E., & Tramblay, Y. (2017). Regional downscaling of Mediterranean droughts under past and future climatic conditions. Global and Planetary Change, 151, 36–48. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.10.015

Kalamaras, N., Michalopoulou, H., & Byun, H. R. (2010). Detection of drought events in Greece using daily precipitation. Hydrology Research, 41(2), Article 2. https://doi.org/10.2166/nh.2010.001

Karamitsiou. (2015). Karamitsiou.

Kweku, D., Bismark, O., Maxwell, A., Desmond, K., Danso, K., Oti-Mensah, E., Quachie, A., & Adormaa, B. (2018). Greenhouse Effect: Greenhouse Gases and Their Impact on Global Warming. Journal of Scientific Research and Reports, 17(6), 1–9. https://doi.org/10.9734/JSRR/2017/39630

Leal Filho, W., Manolas, E., Azul, A. M., Azeiteiro, U. M., & McGhie, H. (Eds.). (2018). Handbook of Climate Change Communication: Vol. 1. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69838-0

Ligkoni. (2021). Ligkoni.

Livada, I., & Assimakopoulos, V. D. (2007). Spatial and temporal analysis of drought in greece using the Standardized Precipitation Index (SPI). Theoretical and Applied Climatology, 89(3–4), 143–153. https://doi.org/10.1007/s00704-005-0227-z

Lopez-Bustins, J. A., Pascual, D., Pla, E., & Retana, J. (2013). Future variability of droughts in three Mediterranean catchments. Natural Hazards, 69(3), Article 3. https://doi.org/10.1007/s11069-013-0754-3

Lorenzo-Lacruz, J., Morán-Tejeda, E., Vicente-Serrano, S. M., & López-Moreno, J. I. (2013). Streamflow droughts in the Iberian Peninsula between 1945 and 2005: Spatial and temporal patterns. Hydrology and Earth System Sciences, 17(1), 119–134. https://doi.org/10.5194/hess-17-119-2013

M. C. Peel. (2007). M. C. Peel.

Mamasis, K. (2007). Drought.

Mathbout, S., Lopez-Bustins, J. A., Royé, D., & Martin-Vide, J. (2021). Mediterranean-Scale Drought: Regional Datasets for Exceptional Meteorological Drought Events during 1975–2019. Atmosphere, 12(8), 941. https://doi.org/10.3390/atmos12080941

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). THE RELATIONSHIP OF DROUGHT FREQUENCY AND DURATION TO TIME SCALES.

Mimikou, M. A., & Baltas, E. A. (2013). Assessment of Climate Change Impacts in Greece: A General Overview. American Journal of Climate Change, 02(01), 46–56. https://doi.org/10.4236/ajcc.2013.21005

Moreira, E. E., Coelho, C. A., Paulo, A. A., Pereira, L. S., & Mexia, J. T. (2008). SPI-based drought category prediction using loglinear models. Journal of Hydrology, 354(1–4), 116–130. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.03.002

Naresh Kumar, M., Murthy, C. S., Sesha Sai, M. V. R., & Roy, P. S. (2009). On the use of Standardized Precipitation Index (SPI) for drought intensity assessment. Meteorological Applications, 16(3), 381–389. https://doi.org/10.1002/met.136

National Drought Mitigation Center. (2018). Documentation.

Petrelis. (2012).

Politi, N., Vlachogiannis, D., Sfetsos, A., Nastos, P. T., & Dalezios, N. R. (2022). High Resolution Future Projections of Drought Characteristics in Greece Based on SPI and SPEI Indices. Atmosphere, 13(9), 1468. https://doi.org/10.3390/atmos13091468

Seo, S. N. (2017). Beyond the Paris Agreement: Climate change policy negotiations and future directions. Regional Science Policy & Practice, 9(2), 121–141. https://doi.org/10.1111/rsp3.12090

Sousa, P. M., Trigo, R. M., Aizpurua, P., Nieto, R., Gimeno, L., & Garcia-Herrera, R. (2011). Trends and extremes of drought indices throughout the 20th century in the

Mediterranean. Natural Hazards and Earth System Sciences, 11(1), 33–51. https://doi.org/10.5194/nhess-11-33-2011

Thom, H. C. S. (1958). A NOTE ON THE GAMMA DISTRIBUTION. Monthly Weather Review, 86(4), 117–122. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1958)086<0117:ANOTGD>2.0.CO;2

Tigkas, D. (2008). Drought Characterisation and Monitoring in Regions of Greece.

Tirivarombo, S., Osupile, D., & Eliasson, P. (2018). Drought monitoring and analysis: Standardised Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Standardised Precipitation Index (SPI). Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 106, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.07.001

Tramblay, Y., Koutroulis, A., Samaniego, L., Vicente-Serrano, S. M., Volaire, F., Boone, A., Le Page, M., Llasat, M. C., Albergel, C., Burak, S., Cailleret, M., Kalin, K. C., Davi, H., Dupuy, J.-L., Greve, P., Grillakis, M., Hanich, L., Jarlan, L., Martin-StPaul, N., … Polcher, J. (2020). Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios. Earth-Science Reviews, 210, 103348. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103348

Trullenque-Blanco, V., Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., Peña-Angulo, D., & González-Hidalgo, C. (2024). Catalogue of drought events in peninsular Spanish along 1916–2020 period. Scientific Data, 11(1), 703. https://doi.org/10.1038/s41597-024-03484-w

Tsesmelis, D. E., Vasilakou, C. G., Kalogeropoulos, K., Stathopoulos, N., Alexandris, S. G., Zervas, E., Oikonomou, P. D., & Karavitis, C. A. (2022). Drought assessment using the standardized precipitation index (SPI) in GIS environment in Greece. In Computers in Earth and Environmental Sciences (pp. 619–633). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89861-4.00025-7

Tsouvalas. (2022).

Turco, M., Von Hardenberg, J., AghaKouchak, A., Llasat, M. C., Provenzale, A., & Trigo, R. M. (2017). On the key role of droughts in the dynamics of summer fires in Mediterranean Europe. Scientific Reports, 7(1), 81. https://doi.org/10.1038/s41598-017-00116-9

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I., García-Vera, M. A., & Stepanek, P. (2010). A complete daily precipitation database for northeast Spain: Reconstruction, quality control, and homogeneity. International Journal of Climatology, 30(8), 1146–1163. https://doi.org/10.1002/joc.1850

Vogel, J., Paton, E., Aich, V., & Bronstert, A. (2021). Increasing compound warm spells and droughts in the Mediterranean Basin. Weather and Climate Extremes, 32, 100312. https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100312

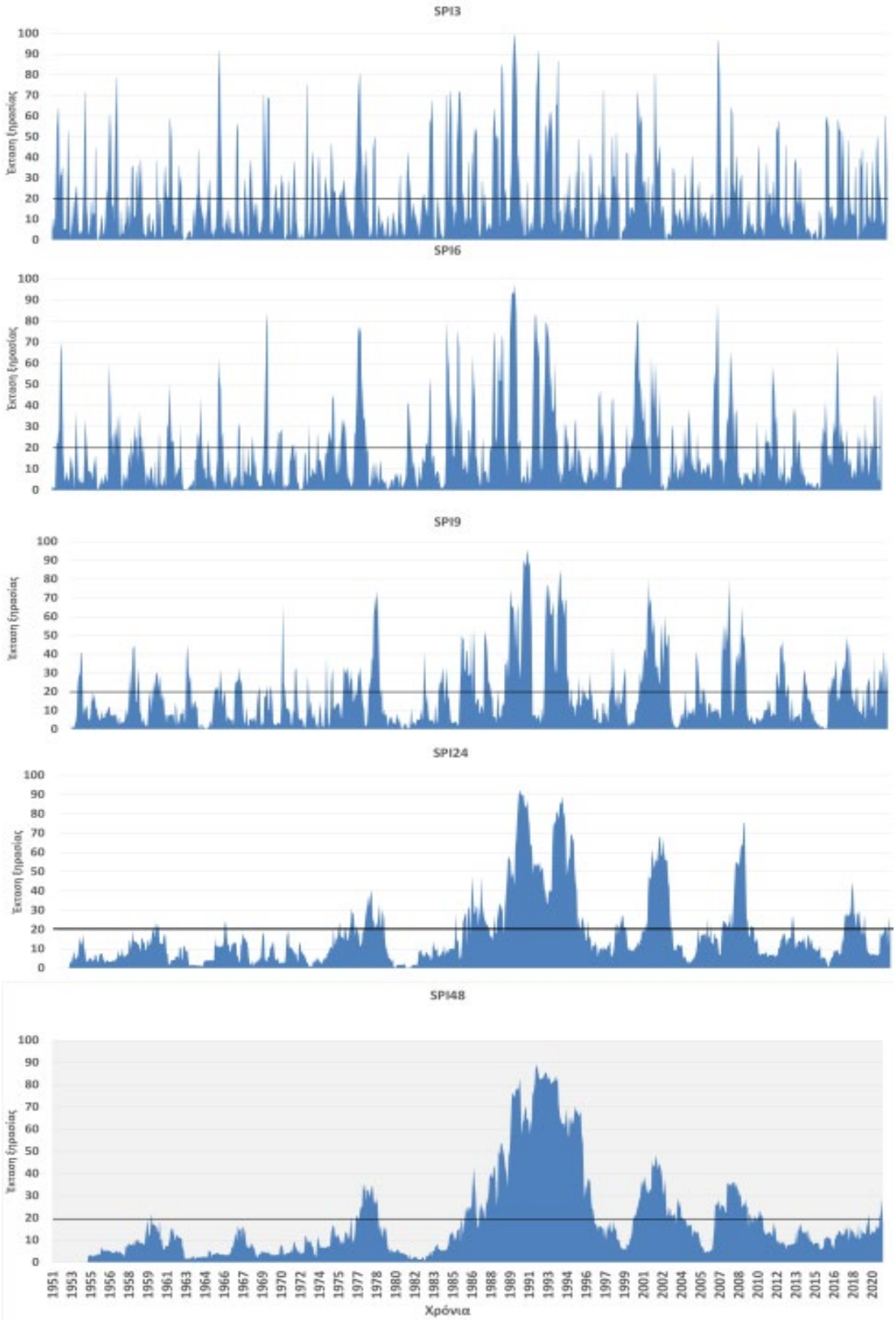
Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: The Drought Phenomenon: The Role of Definitions. Water International, 10(3), 111–120. https://doi.org/10.1080/02508068508686328

ΖΟΥΡΙΔΑΚΗ. (2015).

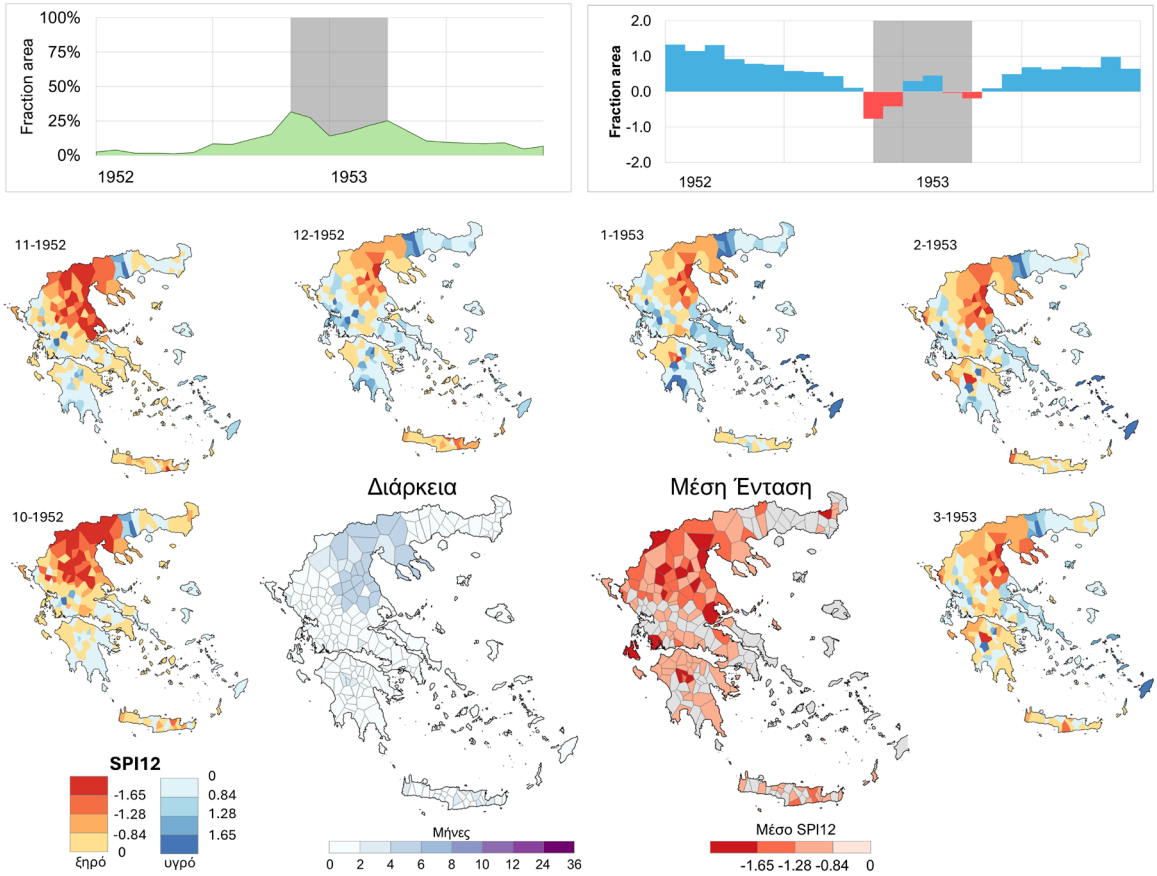
ΘΕΟΧΑΡΗ ΑΙΜΙΛΙΑ-ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ. (2016). Καραμπουρνιώτης. (2012).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

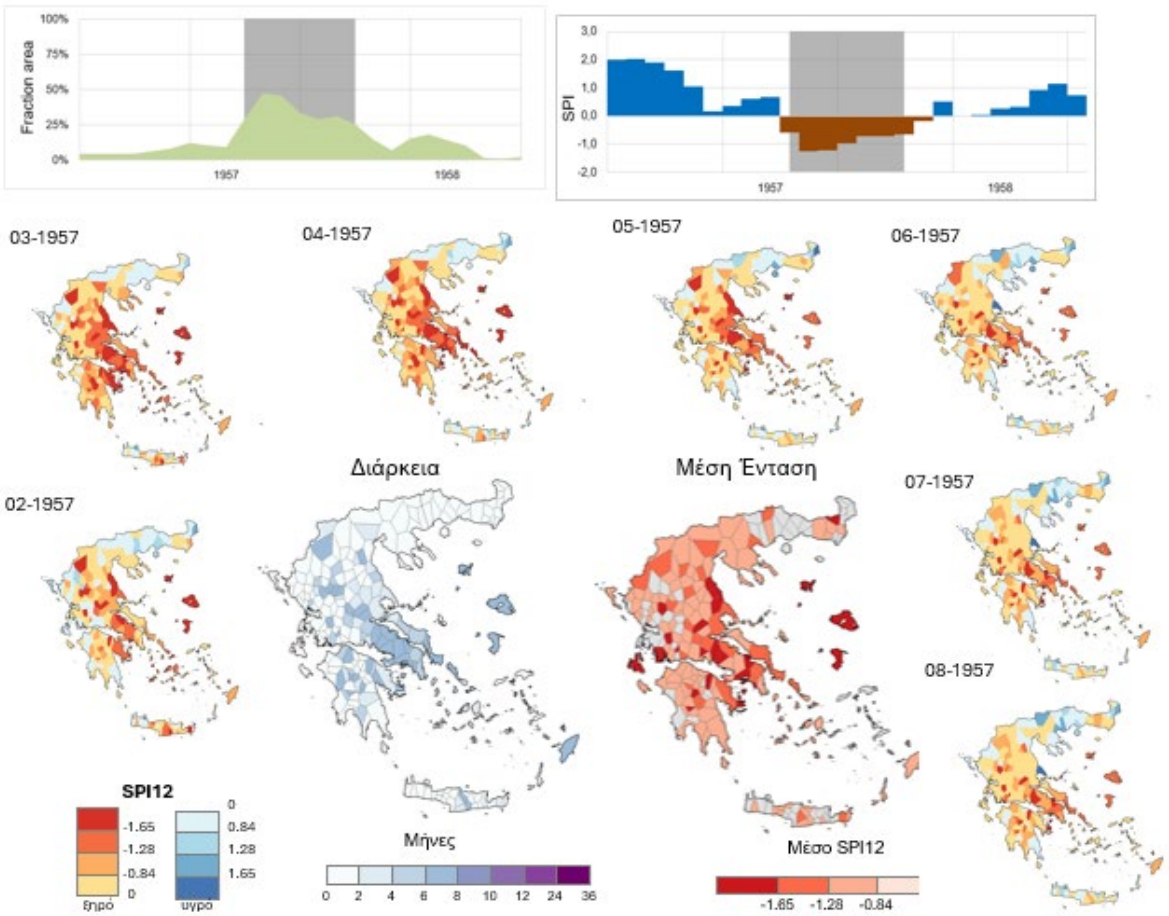
Αποτελέσματα



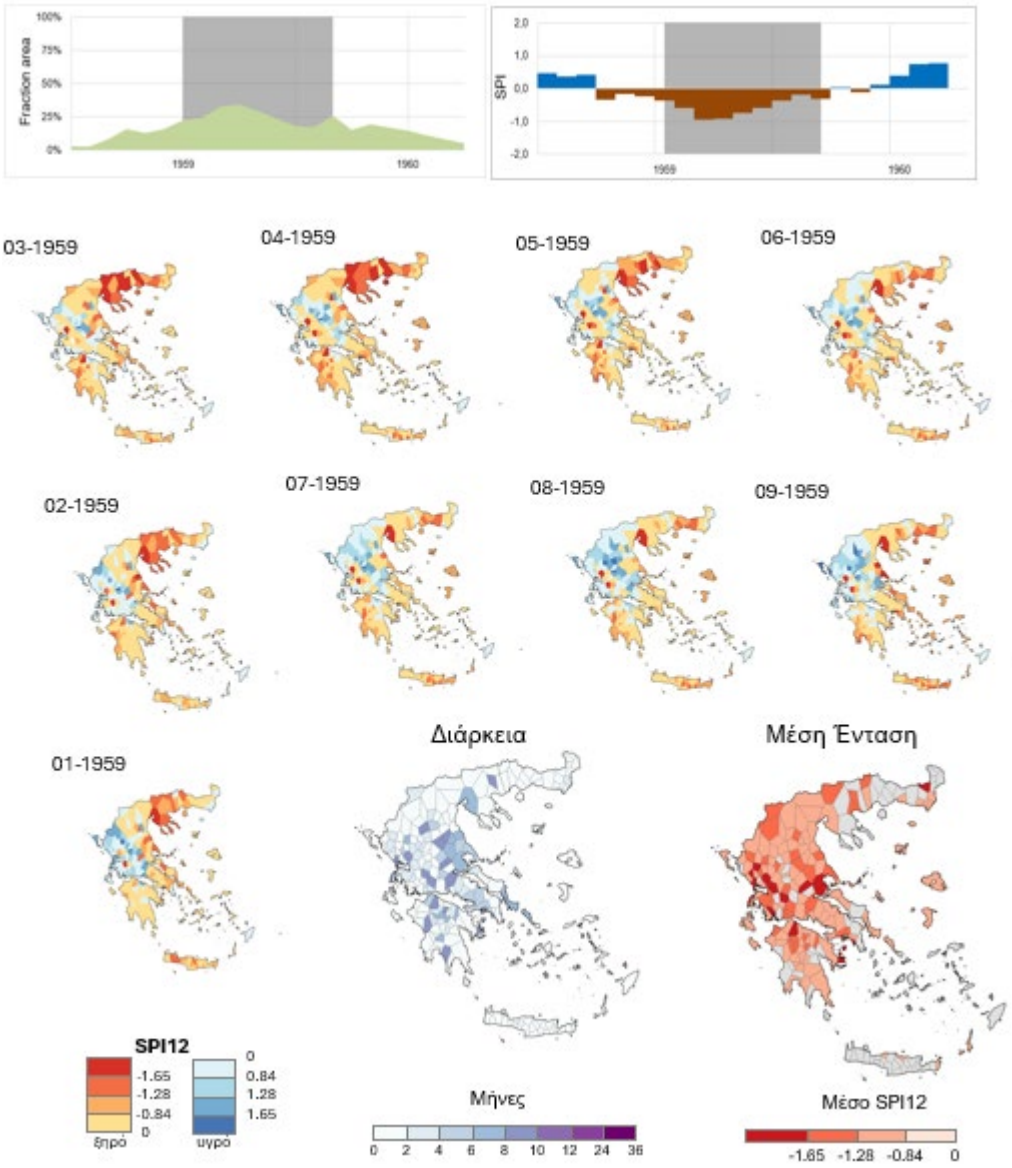
Διάγραμμα 7-1 : Ποσοστό έκτασης του SPI3, SPI6, SPI9, SPI24 και SPI48 προς χρόνια



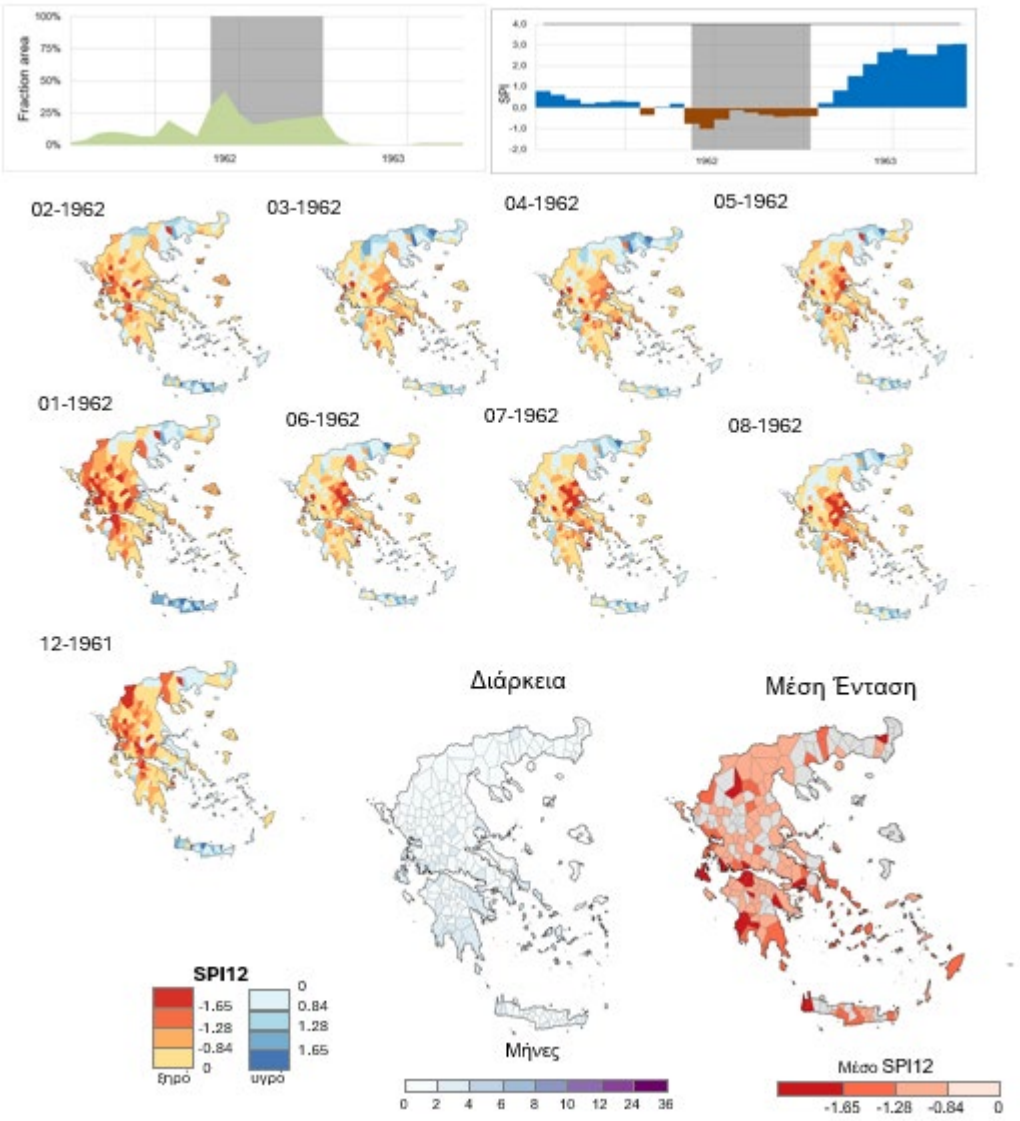
Διάγραμμα 7-2 : Ανάλυση γεγονότος 1 (10/1952–03/1953)



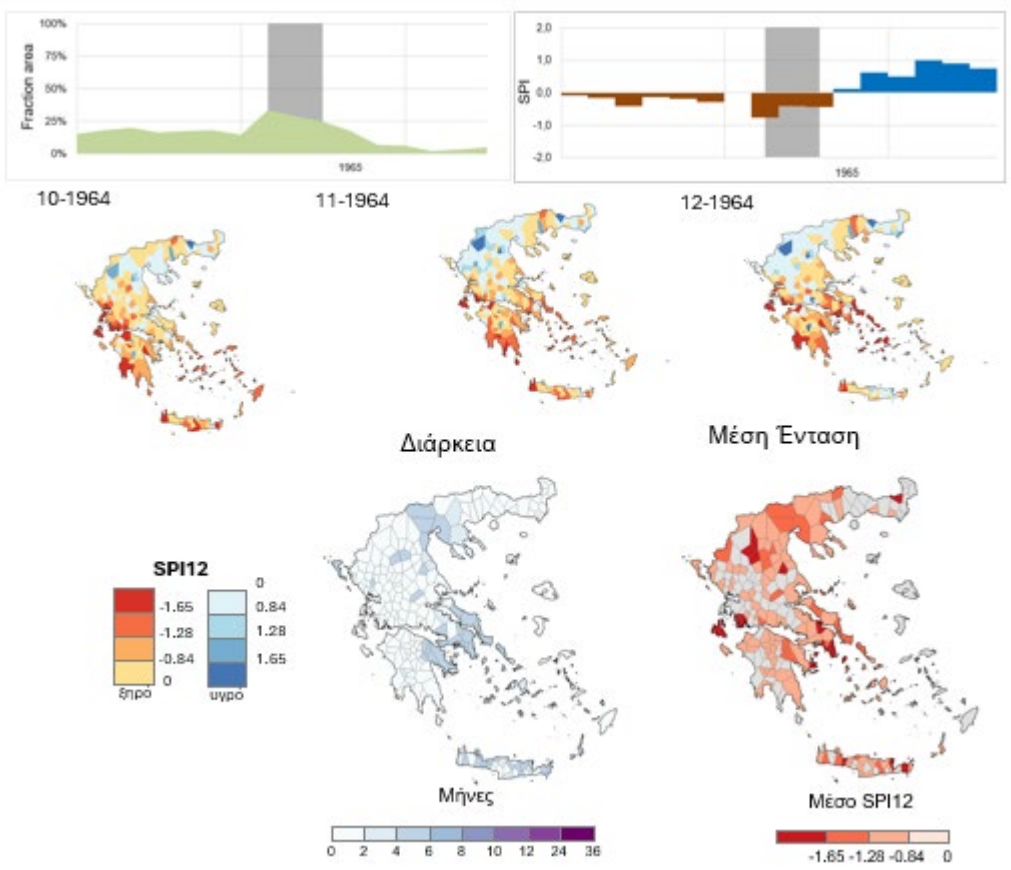
Διάγραμμα 7-3: Ανάλυση γεγονότος 2 (02/1957–08/1957)



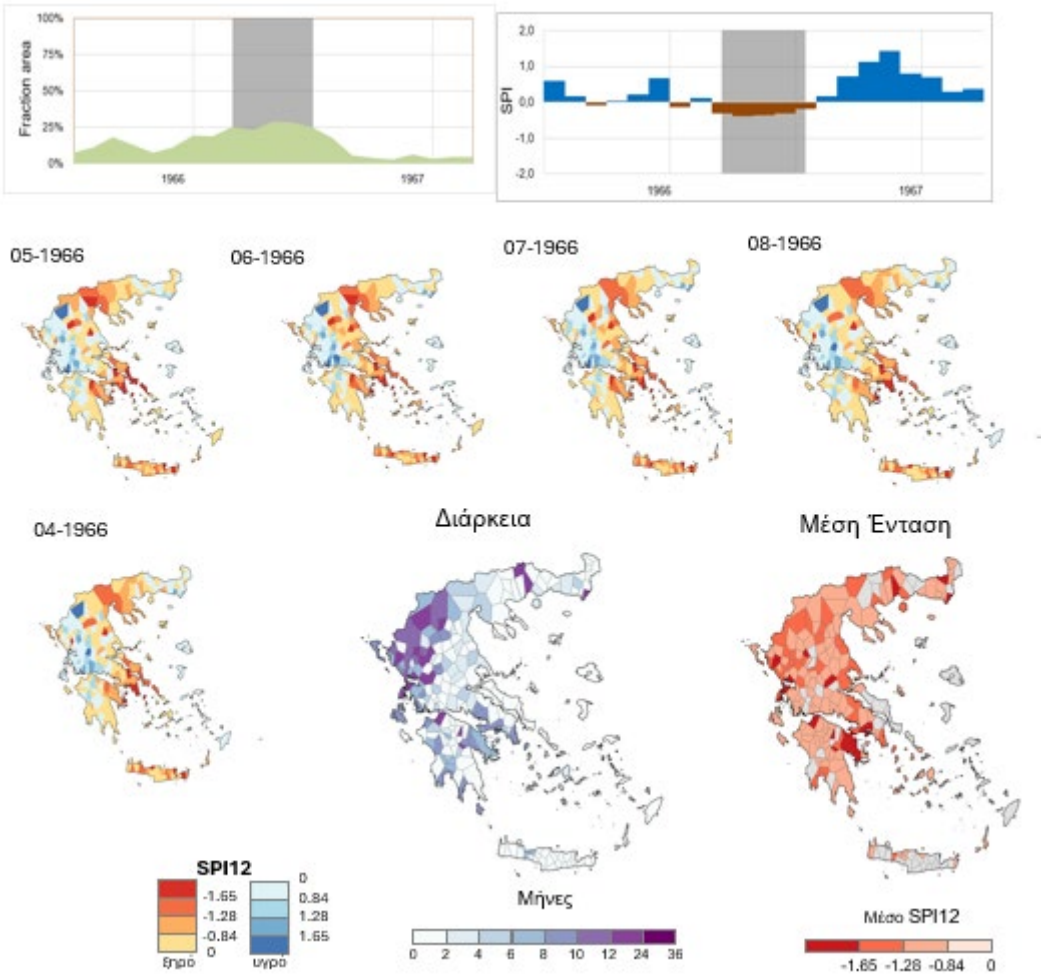
Διάγραμμα 7-4 : Ανάλυση γεγονότος 3 (01/1959–09/1959)



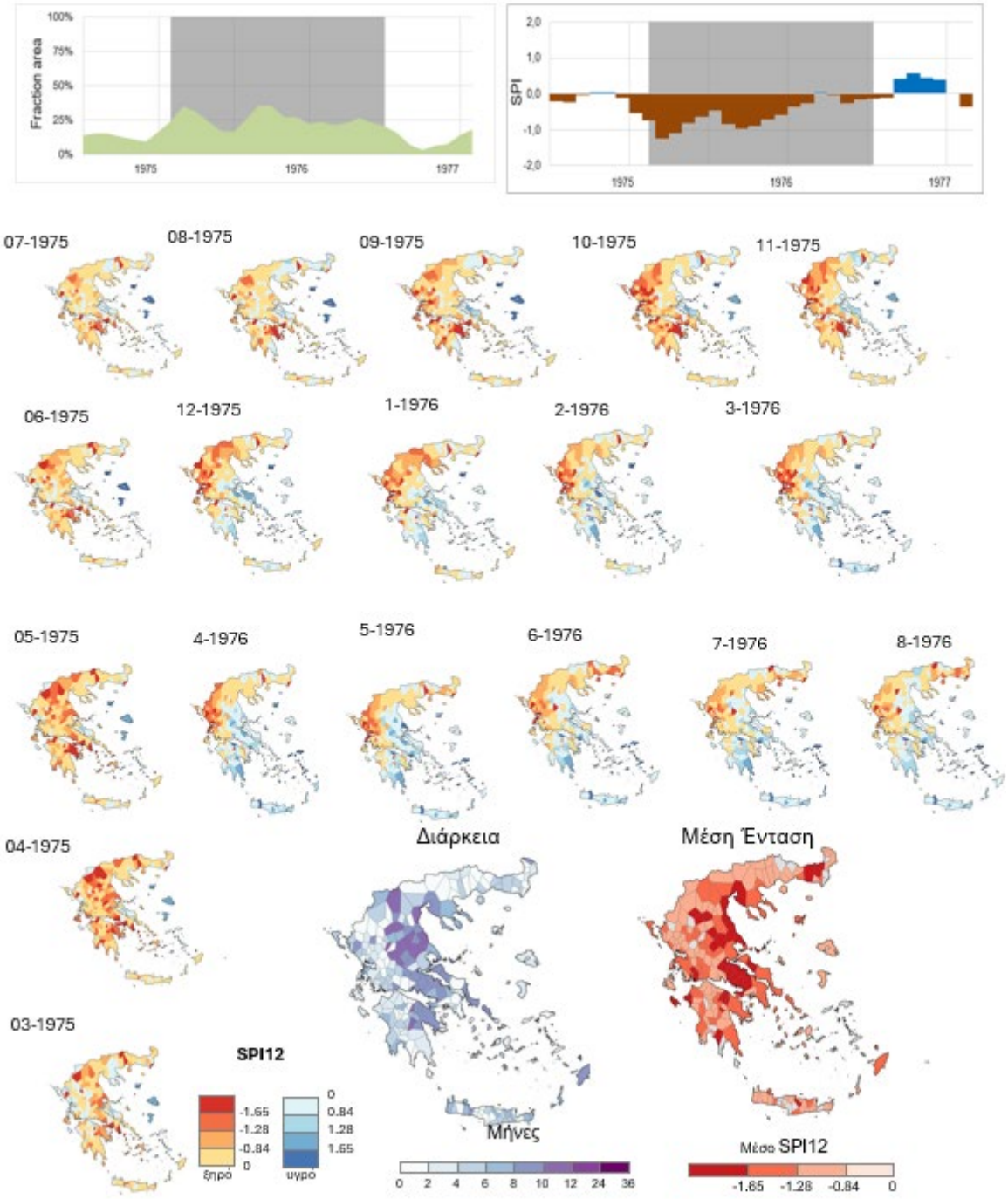
Διάγραμμα 7-5 : Ανάλυση γεγονότος 4 (12/1961–08/1962)



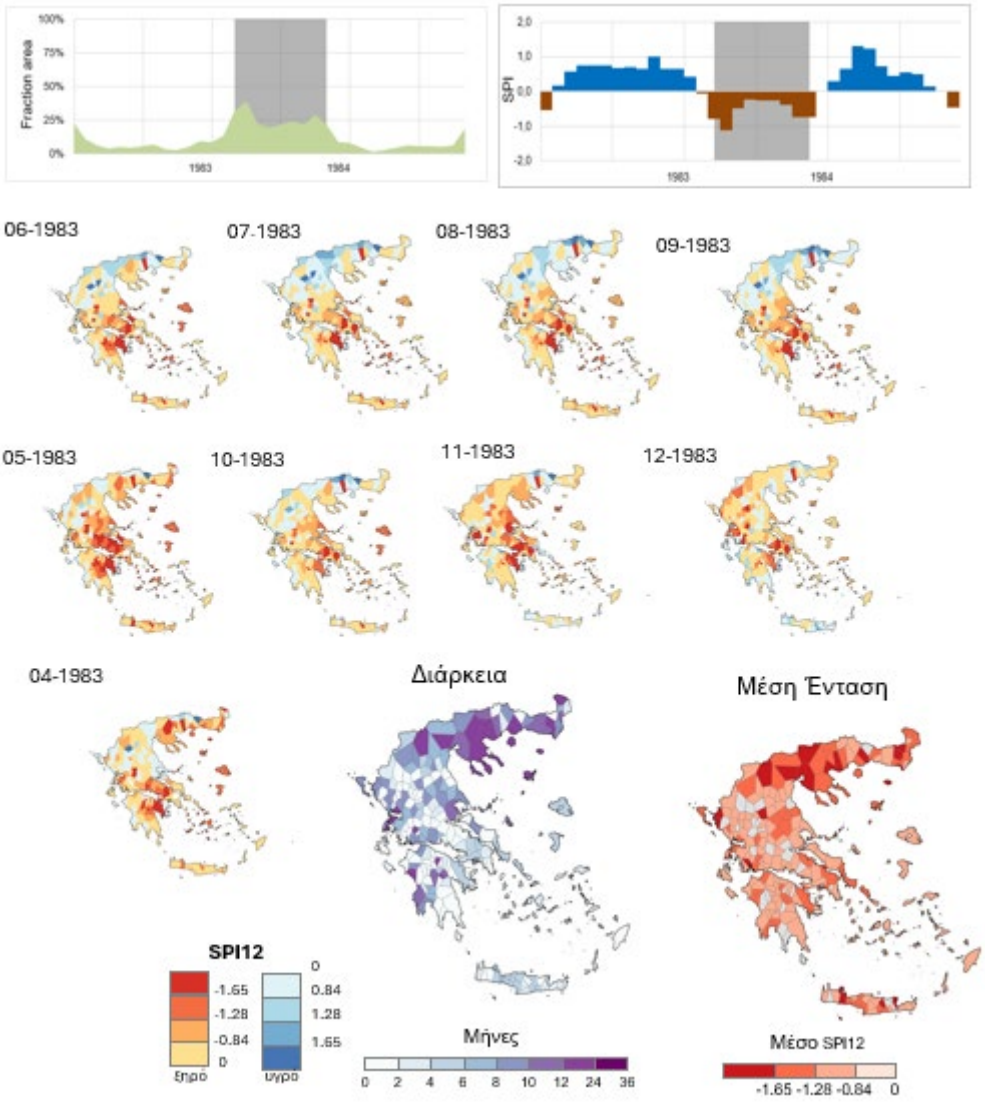
Διάγραμμα 7-6 : Ανάλυση γεγονότος 5 (10/1964–12/1964)



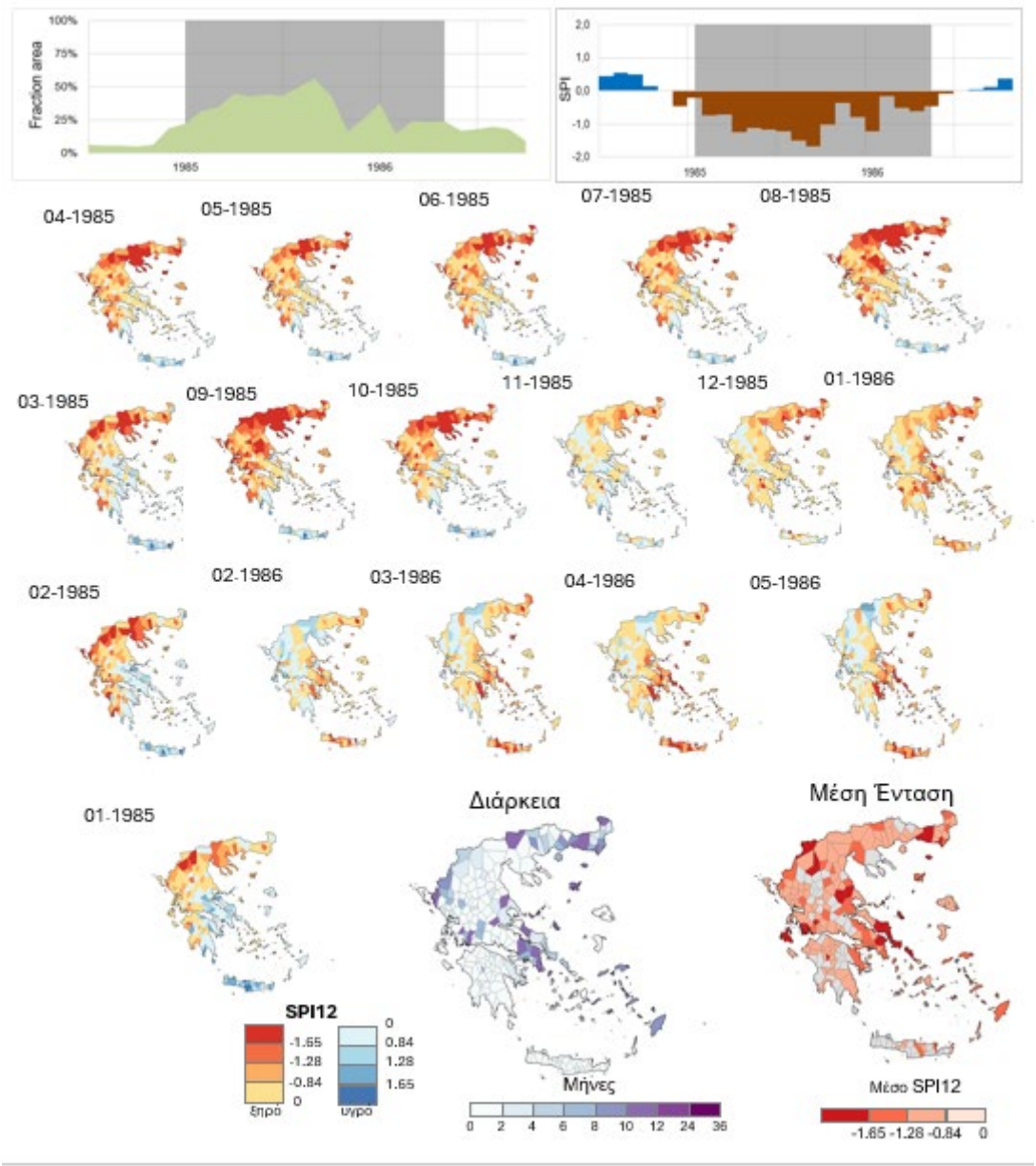
Διάγραμμα 7-7 : Ανάλυση γεγονότος 6 (04/1966–08/1966)



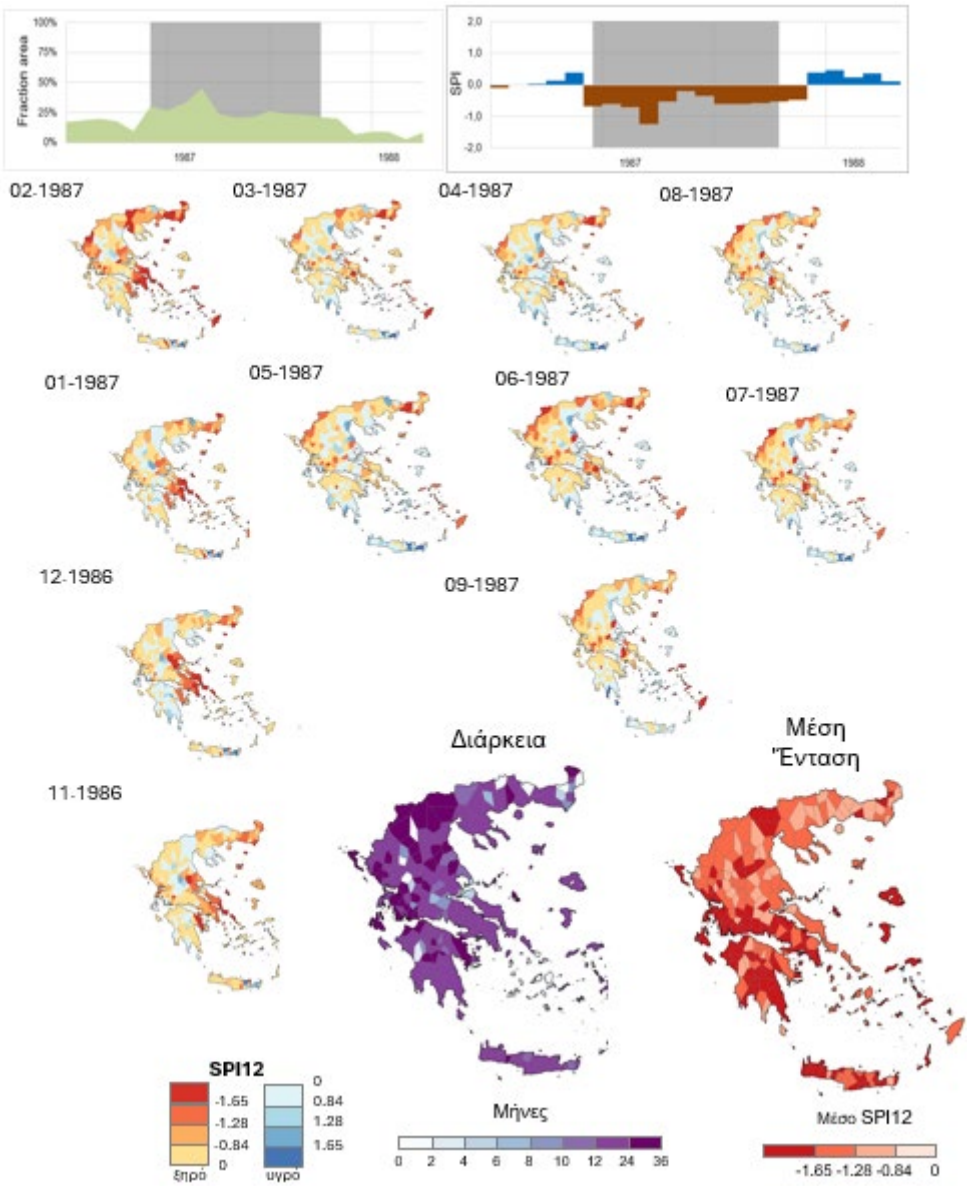
Διάγραμμα 7-8 : Ανάλυση γεγονότος 7 (03/1975–08/1976)



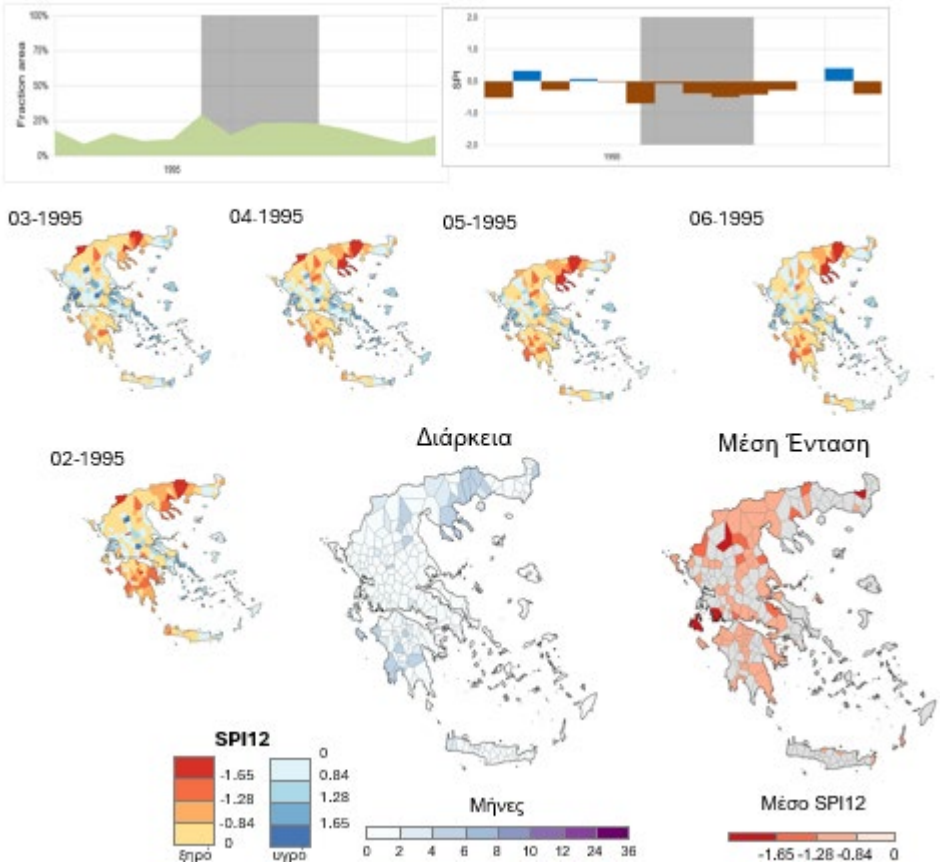
Διάγραμμα 7-9 : Ανάλυση γεγονότος 9 (04/1983–12/1983)



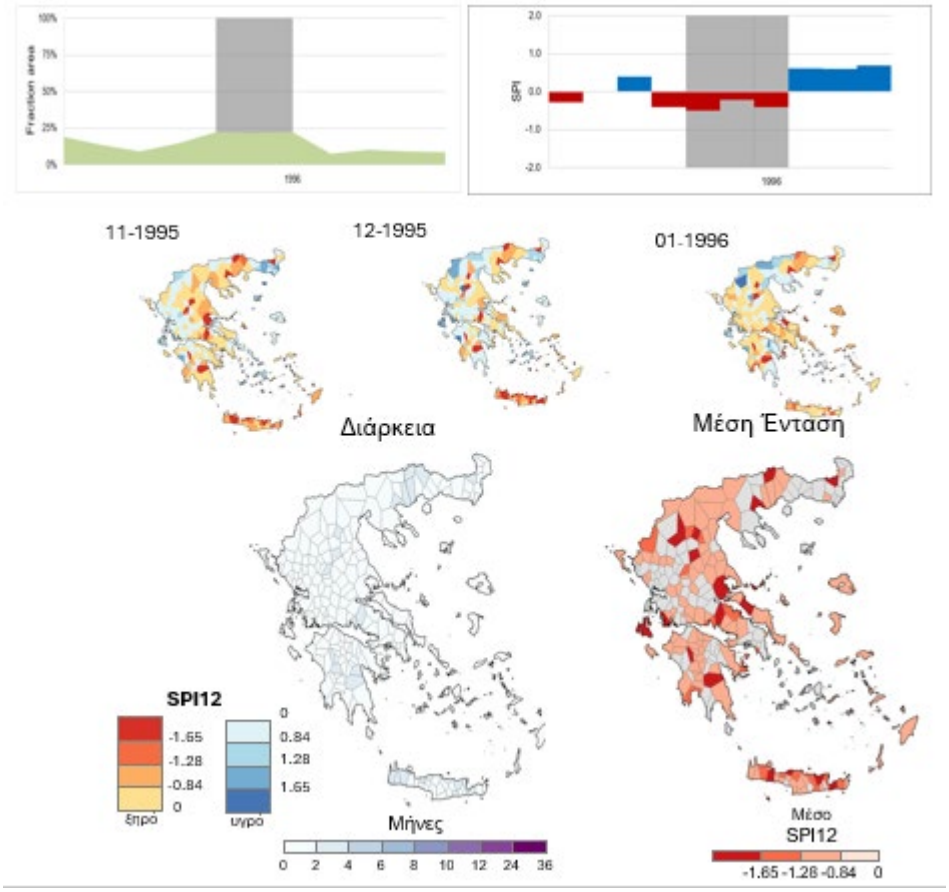
Διάγραμμα 7-10: Ανάλυση γεγονότος 10 (01/1985–05/1986)



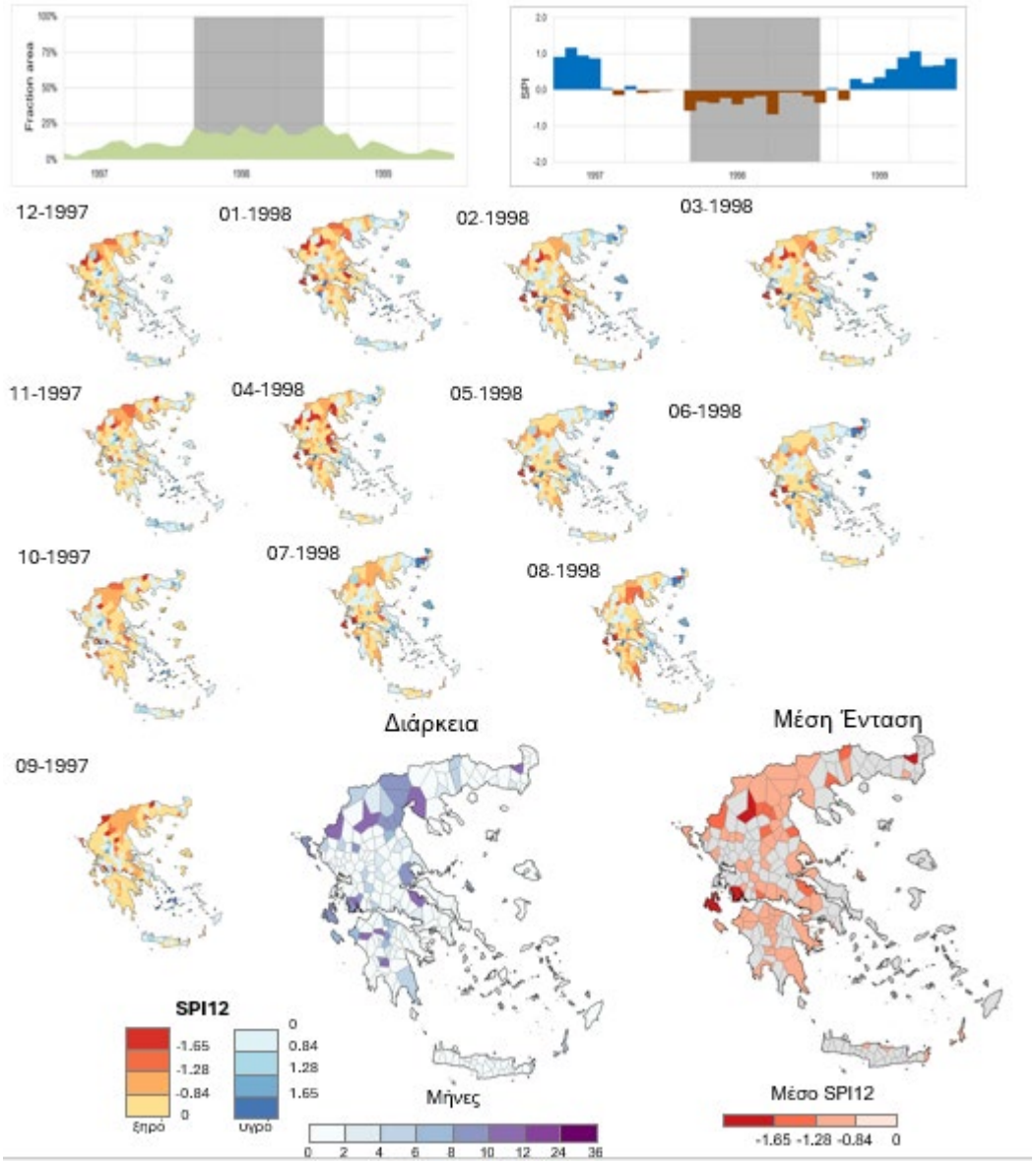
Διάγραμμα 7-11 : Ανάλυση γεγονότος 11 (11/1986–09/1987)



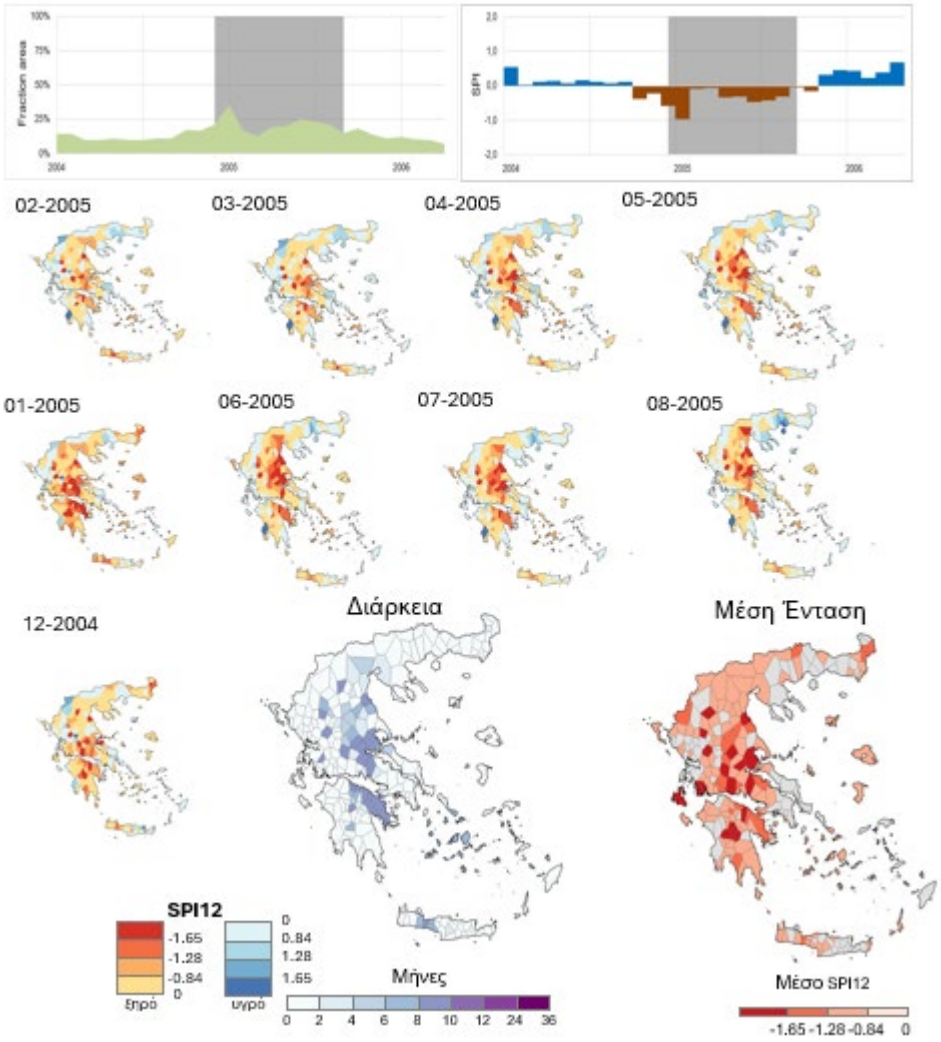
Διάγραμμα 7-12 : Ανάλυση γεγονότος 14 (02/1995–06/1995)



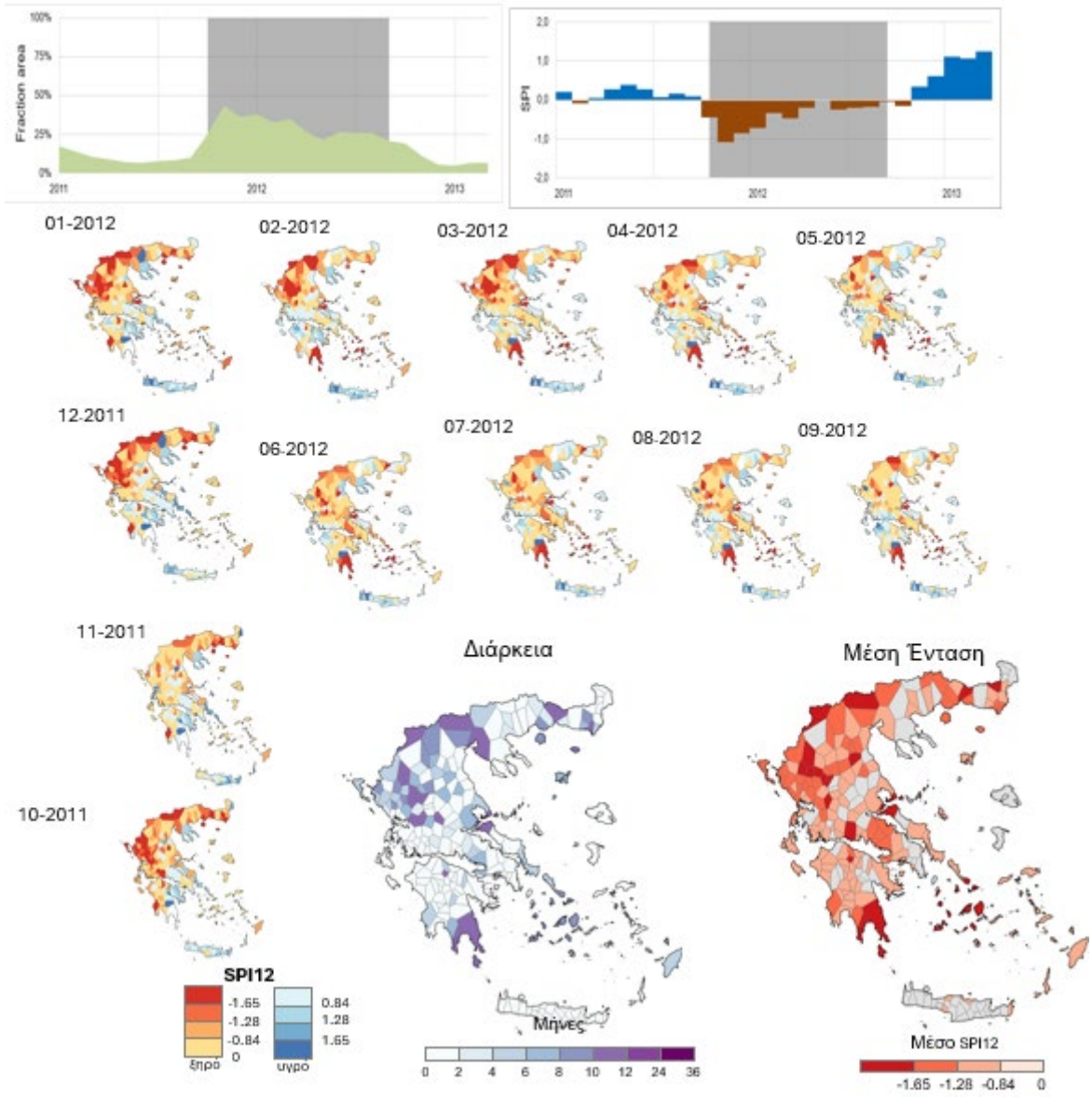
Διάγραμμα 7-13: Ανάλυση γεγονότος 15 (11/1995–01/1996)



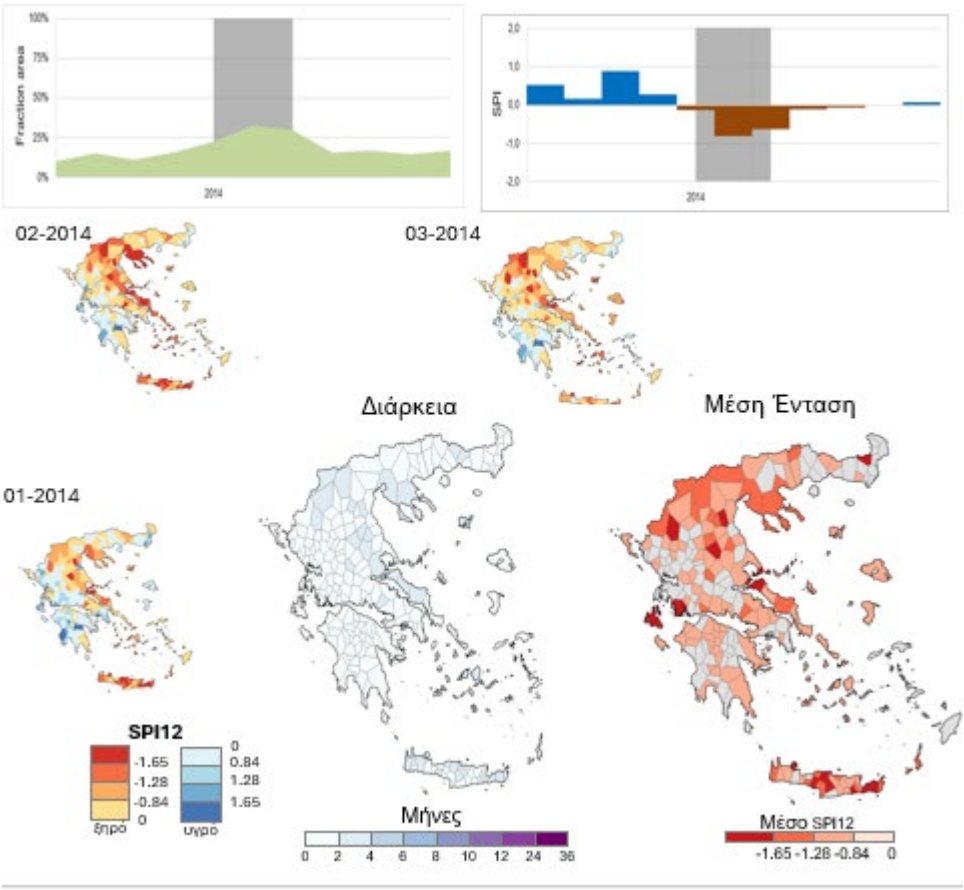
Διάγραμμα 7-14: Ανάλυση γεγονότος 16 (09/1997–08/1998)



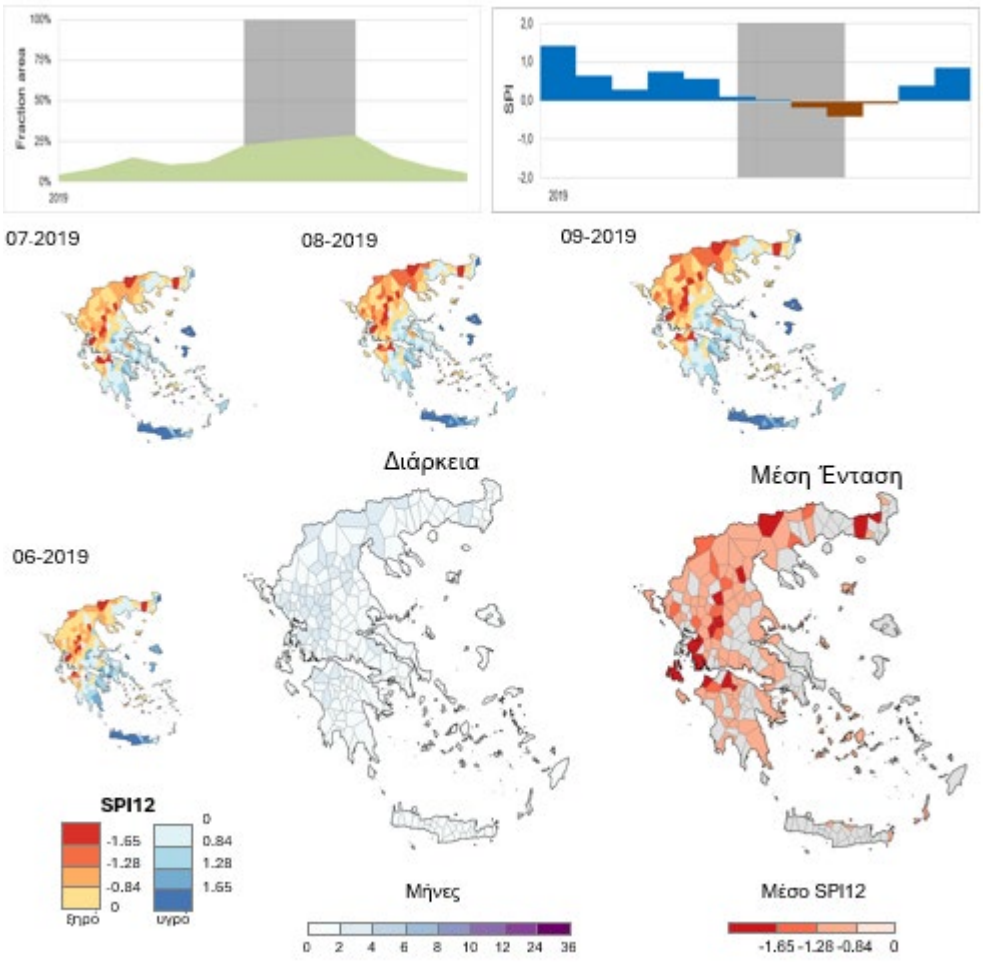
Διάγραμμα 7-15 : Ανάλυση γεγονότος 18 (12/2004–08/2005)



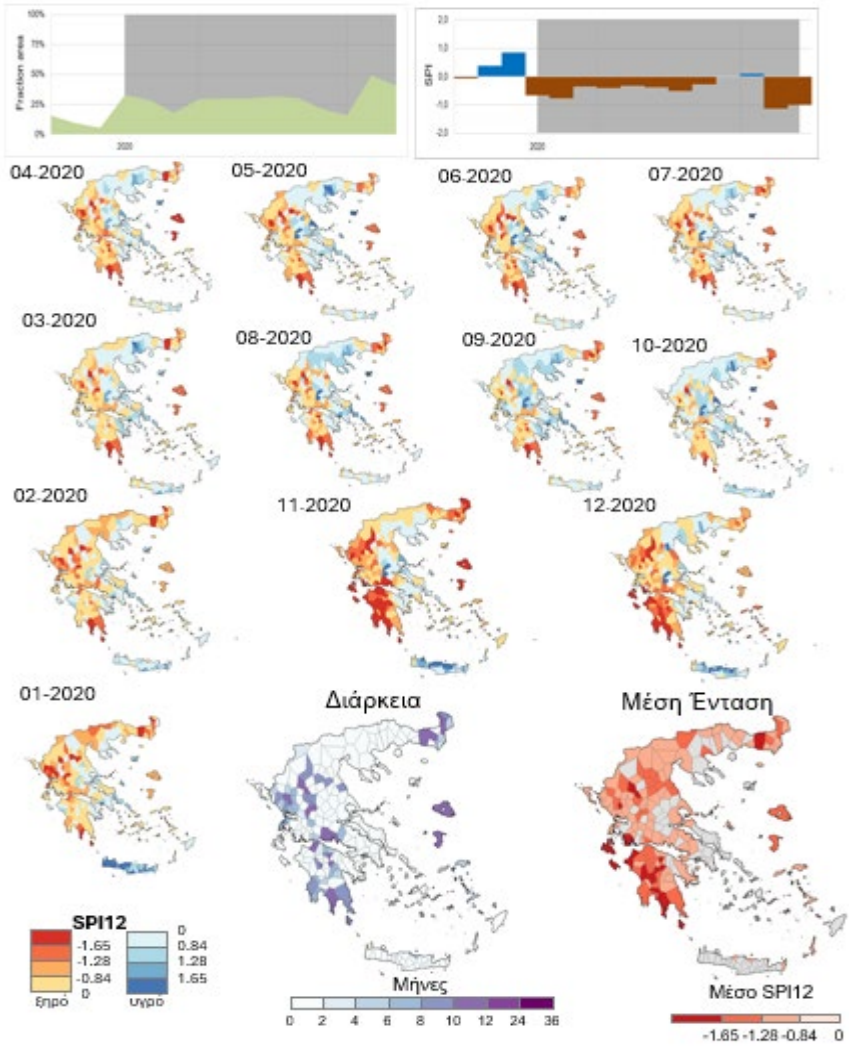
Διάγραμμα 7-16 : Ανάλυση γεγονότος 20 (10/2011–09/2012)



Διάγραμμα 7-17 : Ανάλυση γεγονότος 21 (01/2014–03/2014)



Διάγραμμα 7-18 : Ανάλυση γεγονότος 23 (06/2019–09/2019)



Διάγραμμα 7-19: Ανάλυση γεγονότος 24 (01/2020–12/2020)