



ΠΜΣ-Ατμοσφαιρικές Επιστήμες και Περιβάλλον

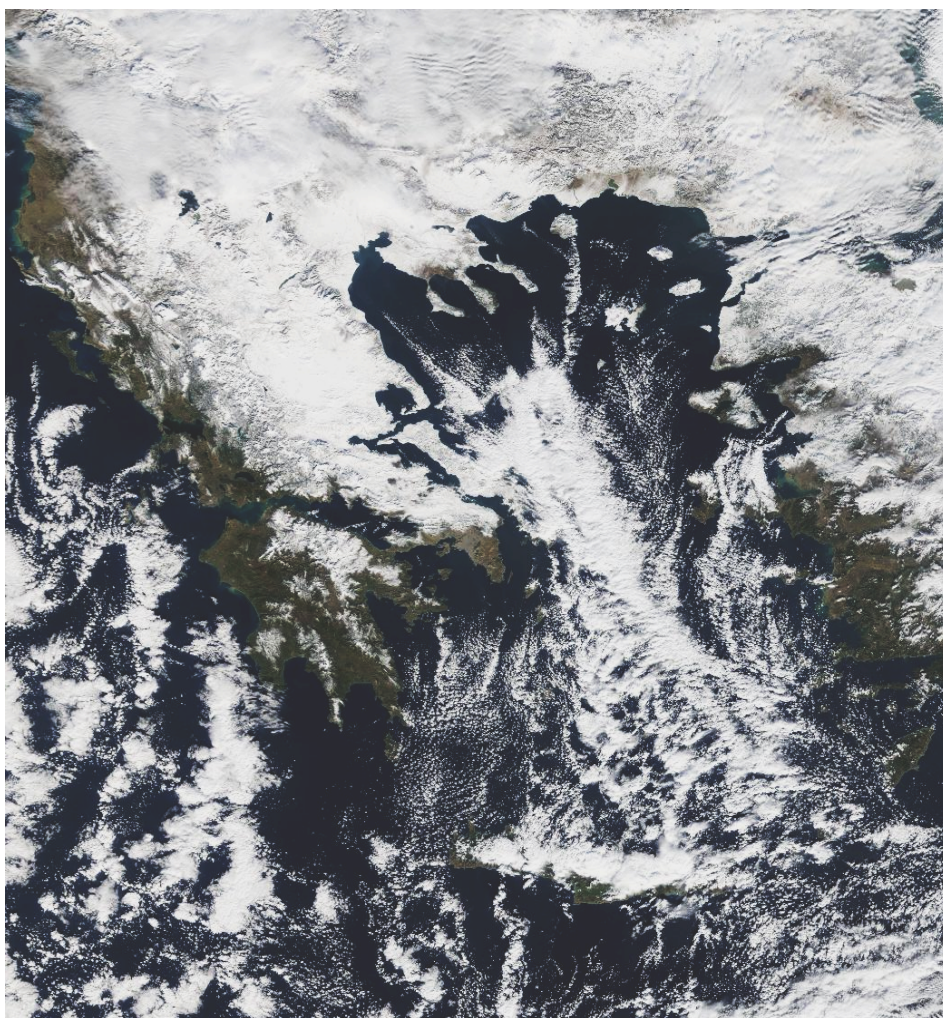


Τμήμα Φυσικής

Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“Ανάλυση συνθηκών χιονιού στην Ελλάδα στο παρόν και στο μελλοντικό κλίμα”



ΜΑΣΛΟΥΜΙΔΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, ΑΜ: 857

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΛΩΛΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ (ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2024-2025

	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΕΛΙΔΑΣ
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	4
ΛΙΣΤΑ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ	6
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	
2.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ	
2.1.1 ΠΑΡΟΝ ΚΛΙΜΑ	13
2.1.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟ ΚΛΙΜΑ	19
2.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	
2.2.1 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΧΙΟΝΙΟΥ ΣΤΟ ΠΑΡΟΝ ΚΛΙΜΑ	20
2.2.2 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΧΙΟΝΙΟΥ ΣΤΟ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟ ΚΛΙΜΑ	21
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	
3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΗΣΤΙΚΑ ΧΙΟΝΟΚΑΛΥΨΗΣ ΣΤΟ ΠΑΡΟΝ ΚΛΙΜΑ	
3.1.1 ΥΨΟΣ ΧΙΟΝΙΟΥ	22
3.1.2 ΕΚΤΑΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΧΙΟΝΟΚΑΛΥΨΗΣ	40
3.1.3 ΧΙΟΝΟΔΡΟΜΙΚΑ ΚΕΝΤΡΑ	60
3.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΗΣΤΙΚΑ ΧΙΟΝΟΚΑΛΥΨΗΣ ΣΤΟ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟ ΚΛΙΜΑ	
3.2.1 ΥΨΟΣ ΧΙΟΝΙΟΥ	69

3.2.2 ΕΚΤΑΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΧΙΟΝΟΚΑΛΥΨΗΣ	75
3.2.3 ΧΙΟΝΟΔΡΟΜΙΚΑ ΚΕΝΤΡΑ	84
4. ΣΥΝΟΨΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	91
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΛΙΣΤΑ ΑΝΑΦΟΡΩΝ	94

Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες, ένα θέμα που έχει απασχολήσει ιδιαιτέρως την επιστημονική κοινότητα, είναι η εξελισσόμενη αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας και η παρελκόμενη αλλαγή του παρόντος κλίματος. Αυτή η διαδικασία, όπως είναι αναμενόμενο αποτελεί καταλυτικό παράγοντα για την διακύμανση και την εξέλιξη των συνθηκών χιονοκάλυψης τόσο χωρικά, όσο και διαχρονικά. Αυτές οι μεταβολές στην χιονοκάλυψη έχουν άμεσο αντίκτυπο στο ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη μέσω της λευκαύγειας και άλλων αλληλεπιδράσεων εδάφους και ατμόσφαιρας. Παράλληλα, η ύπαρξη χιονιού στο έδαφος αποτελεί μια από τις βασικότερες πηγές συσσώρευσης υπόγειων υδάτων και τροφοδοσίας του υδροφόρου ορίζοντα. Υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής, οι αλλαγές στις τιμές της θερμοκρασίας και του υετού που παρατηρούνται σε διάφορες περιοχές του πλανήτη αντικατοπτρίζονται και στις ποσότητες χιονιού καθώς και στην έκταση και στην διάρκεια της χιονοκάλυψης. Η περιοχή της Νοτιοανατολικής ευρώπης, ούσα μια απο τις πλέον ευάλωτες στην αλλαγή κλίματος περιοχές του πλανήτη, έχει ήδη αρχίσει να υφίσταται σημαντικές μεταβολές και στις συνθήκες χιονοκάλυψης. Η συγκεκριμένη μελέτη πραγματεύεται την ανάλυση χρονοσειρών της χιονοκάλυψης στην περιοχή της Ελλάδας κατά την περίοδο 1991-2020 καθώς και τις προβλεπόμενες συνθήκες χιονιού για την περίοδο 2031-2060. Κατά την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα αριθμητικών μοντέλων και δορυφορικών παρατηρήσεων για το κλίμα του παρόντος, και δεδομένα κλιματικών μοντέλων για το κλίμα του μέλλοντος. Η έρευνα εστιάζει στον Ελλαδικό χώρο από βορρά προς νότο αποκαλύπτοντας μια σταδιακή ελάττωση της ποσότητας χιονιού καθώς και την συρρίκνωση τόσο της έκτασης της χιονοκάλυψης όσο και της διάρκειας της. Αυτή η αρνητική τάση ωστόσο, εμφανίζει διακυμάνσεις ανάλογα με τον μήνα, την εποχή και την περιοχή. Η συγκεκριμένη μελέτη εμβαθύνει σε αυτή την ανομοιομορφία της χωρικής και χρονικής εξέλιξης των συνθηκών χιονιού, εστιάζοντας σε τοπικές μεταβολές και ερευνώντας εκτενέστερα το αντίκτυπο της κλιματικής αλλαγής στην περιοχή της Ελλάδας.

Abstract

Over the past few decades, the scientific community has been increasingly concerned with the ongoing rise in global temperatures and the consequent transformation of the Earth's climate. This process, as expected, plays a decisive role in the variability and evolution of snow cover conditions, both spatially and temporally. Changes in snow cover directly affect the planet's energy balance through albedo and other land-atmosphere interactions. Moreover, snow on the ground constitutes a key source of groundwater recharge and plays a vital role in sustaining aquifers.

In the context of climate change, shifts in temperature and precipitation patterns observed in various regions of the world are also reflected in snow amounts, as well as in the extent and duration of snow cover. Southeastern Europe, being one of the most climate-vulnerable regions globally, has already begun to experience notable changes in snow cover conditions.

This study examines the temporal evolution of snow cover in Greece during the period 1991–2020, alongside projections for the period 2031–2060. The analysis incorporates data from numerical weather prediction models and satellite observations for the present climate, as well as outputs from climate models for future scenarios. The research focuses on the Greek territory from north to south, revealing a gradual decline in snow amounts, alongside a reduction in both the spatial extent and temporal duration of snow cover. However, this downward trend displays significant variability depending on the month, season, and geographical area.

The study explores this spatial and temporal heterogeneity in detail, highlighting localized changes and providing a comprehensive assessment of the impacts of climate change on snow conditions across Greece.

ΛΙΣΤΑ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
RCP	Representative Concentration Pathway
ECV	Essential Climate Variable
GCOS	Global Climate Observing System
WMO	World Meteorological Organization
RCM	Regional Climate Models
GCM	Global Climate Models
CERRA	Copernicus European Regional RE-Analysis
IMS	Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration's
NESDIS	National Environmental Satellite Data and Information Service

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χιονόπτωση αποτελεί ένα σύνθετο ατμοσφαιρικό φαινόμενο, το οποίο λαμβάνει χώρα όταν η συμπύκνωση των υδρατμών ενός νέφους πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από το σημείο πήξεως, οδηγώντας στον σχηματισμό παγοκρυστάλλων. Αναλυτικότερα, σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των -8°C , οι παγοκρυστάλλοι αυτοί διατηρούν μικρό μέγεθος (έως 3 mm) και εμφανίζονται ως λεπτές, διάφανες ή αδιάφανες νιφάδες. Αντίθετα, σε θερμοκρασίες υψηλότερες των -8 βαθμών Κελσίου, οι παγοκρυστάλλοι μεγεθύνονται, ενώνονται και εγκαταλείπουν το νέφος που δεν μπορεί πλέον να τους συγκρατήσει λόγω της αυξημένης τους μάζας. Σημαντική προϋπόθεση για την εκδήλωση του φαινομένου της χιονόπτωσης, είναι η μέση θερμοκρασία μεταξύ της βάσης του νέφους και του εδάφους να είναι ίση ή μικρότερη του μηδενός. Υπό συνθήκες έντονης χιονόπτωσης και χαμηλών θερμοκρασιών, είναι δυνατή η συσσώρευση χιονιού, οδηγώντας στη δημιουργία χιονοκάλυψης του εδάφους.

Το χιόνι είναι πολύ ευεργετικό για την φύση, καθώς προστατεύει την χλωρίδα από το ψύχος δημιουργώντας ένα μονωτικό κάλυμμα ενώ τροφοδοτεί παράλληλα, τα επίγεια και υπόγεια ύδατα του πλανήτη με μεγάλες ποσότητες νερού, αφού το αργό λιώσιμο του, επιτρέπει την διείσδυση του ύδατος στο χώμα. Συνεπώς, η χιονόπτωση και η συσσώρευση του χιονιού στο έδαφος, είναι μετεωρολογικές παράμετροι που είναι καθοριστικές για τα κλιματικά χαρακτηριστικά πολλών περιοχών του πλανήτη διαμορφώνοντας τα οικοσυστήματα και αποτελώντας θεμελιώδη παράγοντα επιβίωσης πολλών ειδών χλωρίδας και πανίδας, ενώ παράλληλα, επηρεάζει άμεσα και την λειτουργία των ανθρώπινων κοινωνιών. Είναι λογικός ο συνειρμός λοιπόν, πως οποιαδήποτε αλλαγή στις συνθήκες χιονιού σε κάποια περιοχή του πλανήτη μπορεί να φέρει σημαντικές επιπτώσεις τόσο σε περιβαλλοντικά, όσο και σε κοινωνικά και οικονομικά ζητήματα.

Η κατ' εξακολούθηση άνοδος της θερμοκρασίας και οι παρελκόμενες αλλαγές που προξενεί στα χαρακτηριστικά κλιματικών συνθηκών σε τοπικό αλλά και σε πλανητικό επίπεδο, έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας, η οποία σπεύδει στην διεκπαιρέωση ερευνών που επικεντρώνονται στην μελέτη των αιτίων, της παρούσας κατάστασης και της εξέλιξης αυτών των κλιματικών μεταβολών αλλά και

στην διευκρίνιση του αντίκτυπου που έχουν στην λειτουργικότητα των κοινωνιών και των οικοσυστημάτων. Οι μετεωρολογικές παράμετροι είναι άρρηκτα συνδεδεμένες μεταξύ τους, και κατα συνέπεια η μεταβολή μιας εξ αυτών δύναται να οδηγήσει σε αλλαγές και σε όλες τις υπόλοιπες. Κατά αυτόν τον τρόπο, η άνοδος της παγκόσμιας θερμοκρασίας έχει άμεση επιρροή και στην χωρική και χρονική κατανομή των υπόλοιπων μετεωρολογικών χαρακτηριστικών, και διαχρονικά στις κλιματικές συνθήκες τοπικά και πλανητικά (Sturm et al., 2017). Η συσχέτιση της παραμέτρου της θερμοκρασίας με τις μεταβλητές χιονιού είναι αυταπόδεικτη και η κλιματική αλλαγή έχει ήδη επιφέρει τεράστιες μεταβολές τους σε πολλές περιοχές του βορείου ημισφαιρίου (Pulliainen et al., 2020; Gottlieb and Mankin, 2024). Ήδη η εξελικτική πορεία των συνθηκών χιονιού έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές (Beniston et al., 2018; Tran et al., 2024), καθώς η ύπαρξη χιονιού στο έδαφος παίζει σημαντικό ρόλο στην διατήρηση του υδρολογικού κύκλου μιας και είναι υπεύθυνη για την τροφοδοσία των ποταμών, λιμνών και των υπόγειων υδάτων. Με αυτόν τον τρόπο, η χιονοκάλυψη, διαδραματίζει ένα καταλυτικό ρόλο στην διαθεσιμότητα ύδατος για ανθρώπινη χρήση και κατανάλωση, αφού στις περισσότερες ηπειρωτικές περιοχές του βορείου ημισφαιρίου τα ετήσια αποθέματα νερού καθορίζονται κυρίως από το λιώσιμο του χιονιού (Barnett et al., 2005). Η παγκόσμια θέρμανση έχει ήδη οδηγήσει σε σημαντικές μεταβολές στις κλιματικές συνθήκες χιονιού σε πολλές περιοχές του πλανήτη (Henderson et al., 2018; Notarnicola et al., 2022; Brown, 2020; Beniston et al., 1997). Αυτές οι μεταβολές αφορούν τόσο την ποσότητα του εναποτιθέμενου χιονιού, όσο την έκταση και την διάρκεια της χιονοκάλυψης, επιφέροντας με αυτόν τον τρόπο μεγάλες αλλαγές στην μείωση της λευκαύγειας και απορρυθμίζοντας έτσι το ενεργειακό ισοζύγιο της γήινης ατμόσφαιρας (Flanner et al., 2011). Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί πώς η απορρόφηση του χιονιού από το έδαφος συμβάλει σε σημαντικό βαθμό, στο είδος, την πυκνότητα και την έκταση της βλάστησης. Μέσω αυτής της συσχέτισης, προκύπτει μια έμμεση αλληλεπίδραση μεταξύ χιονοκάλυψης και περιόδων πυρκαγιάς, επηρεάζοντας έτσι και τον κύκλο του άνθρακα (Pulliainen et al., 2017). Η αμοιβαία αλληλεπίδραση των μετεωρολογικών παραμέτρων μεταξύ τους, αλλά και με τα εκάστοτε οικοσυστήματα, συμπεριλαμβανομένων και των ανθρώπινων κοινωνιών, επιβεβαιώνεται διαχρονικά, οδηγώντας σε μια διαρκή σχέση αλληλεξάρτησης. Αυτή η σχέση, καθιστά τις κλιματικές μεταβλητές ευάλωτες στις αλλαγές των περιβαλλοντικών συνθηκών, ιδιαίτερα αν οι αλλαγές οφείλονται σε

ανθρωπογενείς παράγοντες και παράλληλα η διατήρηση των οικοσυστημάτων εξαρτάται άμεσα από τις κλιματικές διεργασίες. Συνεπώς, η μελέτη της εξέλιξης των κλιματικών μεταβολών, αποτελεί υψηλής σημασίας αντικείμενο μελέτης.

Το χιόνι, επίσης, αποτελεί θεμελιώδης βάση της βιωσιμότητας των οικονομιών που βασίζονται στις χειμερινές δραστηριότητες όπως είναι η χιονοδρομία και ο χειμερινός τουρισμός (Steiger et al., 2017; Ogrin et al., 2011). Σύμφωνα με δεδομένα του 2017, περίπου 350 εκατομμύρια άνθρωποι επισκέπτονται ετησίως χιονοδρομικά κέντρα παγκοσμίως, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία και την ευρεία επιρροή του χειμερινού τουρισμού στις τοπικές οικονομίες. Στην Ευρωπαϊκή ήπειρο, η επίδραση του είναι σαφώς πιο εμφανής στις ορεινές περιοχές όπου ο τουρισμός αποτελεί βασικό πυλώνα της οικονομικής δραστηριότητας. Ωστόσο, καθώς οι χιονοδρομικές δραστηριότητες και ο χειμερινός τουρισμός εμφανίζουν άμεση εξάρτηση από την ύπαρξη χιονιού στο έδαφος, τεχνητού ή μη, η κλιματική αλλαγή και η άνοδος της παγκόσμιας θερμοκρασίας αποτελούν σημαντική απειλή. Πλήθος ερευνών έχει ήδη εξετάσει το αντίκτυπο αυτών των κλιματικών αλλαγών στις οικονομίες που είναι εξαρτώμενες από τον χειμερινό τουρισμό, αποκαλύπτοντας τους κινδύνους που ελλοχεύουν για την βιωσιμότητα των χειμερινών προορισμών και των χιονοδρομικών κέντρων (Maslounidis et al., 2023; Scott et al., 2006; Moreno - Gene et al., 2018). Οι εν λόγω έρευνες έχουν δείξει ότι υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής και την άνοδο της παγκόσμιας θερμοκρασίας, αναμένεται μέσα στα επόμενα χρόνια να συρρικνωθεί σημαντικά η περίοδος λειτουργίας των χιονοδρομικών κέντρων που εξαρτώνται από την ύπαρξη φυσικού χιονιού με αποτέλεσμα την μείωση των εσόδων των τοπικών επιχειρήσεων. Παραδείγματος χάριν, μια έρευνα που εστιάζει στα χιονοδρομικά της Σλοβακίας έδειξε μείωση των πωλήσεων εισιτηρίων κατά 6% τα τελευταία έτη όπου η θερμοκρασία στην περιοχή έχει παρουσιάσει αύξηση κατά 1 βαθμό κελσίου, ενώ παράλληλα προβλέπει περαιτέρω μείωση των εσόδων έως και 19% αν μελλοντικά επαληθευτεί η εκτίμηση για άνοδο της θερμοκρασίας έως και 3.2 βαθμούς κελσίου που βασίζεται σε υψηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (Demiroglu et al., 2015). Επιπροσθέτως, η 6η αναφορά του IPCC τόνισε την μεγάλη αμφιβολία όσον αφορά την βιωσιμότητα του χειμερινού τουρισμού στην Ευρώπη και κυρίως στο ανατολικό της τμήμα, συνεπώς απαιτείται περισσότερη και πιο σύνθετη έρευνα επί του θέματος (IPCC, 2022).

Η πιο πρόσφατη έρευνα σχετικά με την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στον χειμερινό τουρισμό ήταν κομμάτι του ερευνητικού προγράμματος Copernicus και αφορά τον Ευρωπαϊκό τουρισμό. Σε αυτή την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το 1960 έως το 2015 (Morin et al., 2021). Τα αποτελέσματα έδειξαν μεγάλη μεταβλητότητα των συνθηκών χιονιού διαχρονικά και προβλέπουν μεγάλη μείωση του όγκου χιονιού σε όλες τις ορεινές περιοχές της Ευρωπαϊκής ηπείρου κατά την διάρκεια του 21ου αιώνα βασιζόμενα σε όλα τα σενάρια εκπομπής CO₂. Εστιάζοντας στην Ελλάδα, μια πρόσφατη μελέτη έδειξε το αντίκτυπο της κλιματικής αλλαγής στον χειμερινό τουρισμό δίνοντας έμφαση στο χιονοδρομικό κέντρο Παρνασσού υπό την επιρροή του σεναρίου εκπομπής RCP 4.5 (Tsilogianni et al., 2023). Τα ευρήματα έδειξαν μια σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας την περίοδο 2051-2060 σε σύγκριση με την δεκαετία 1971-1980 υποδεικνύοντας μια παρελκόμενη μείωση χιονοπτώσεων και συρρίκνωση της συνολικής περιόδου με χιονοκάλυψη. Επιπλέον η άνοδος της θερμοκρασίας θα καταστήσει δυσκολότερη την δημιουργία τεχνητού χιονιού, δυσχαιρένοντας ακόμα περισσότερο την ομαλή πορεία του χειμερινού τουρισμού στην χώρα.

Είναι σημαντικό να επισημανθεί πως, παρόλο που το πλανητικό σύστημα κλιματικής παρακολούθησης (GCOS) του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού (WMO) έχει αναγνωρίσει το χιόνι ως μια πολύ σημαντική κλιματική μεταβλητή (ECV) (WMO, 2022), στην Ελλάδα δεν υπάρχει δίκτυο σταθμών που πραγματοποιούν τέτοιου είδους μετρήσεις και συνεπώς τα δεδομένα για την συγκεκριμένη κλιματική παράμετρο είναι ελάχιστα. Η έλλειψη μετρήσεων μεταβλητών χιονιού επιφέρει πολλά προβλήματα και λειτουργεί ως τροχοπέδη σε διεκπαιρούμενες μελέτες. Αυτή η σειρά προβλημάτων περιλαμβάνει τις λανθασμένες εκτιμήσεις διαθεσιμότητας καθαρού νερού, τις λανθασμένες αρχικές συνθήκες σε αριθμητικά μοντέλα, καθώς και μοντέλα προσομοιώσεων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση πιθανότητας πλημμύρας. Επιπροσθέτως, η έλλειψη δεδομένων χιονιού δυσκολεύει τις προγνώσεις καιρού τον χειμώνα αφού τα μοντέλα δεν μπορούν να λάβουν υπόψη αξιόπιστες τιμές για την χιονοκάλυψη, η οποία επηρεάζει τοπικά μετεωρολογικές παραμέτρους σε τοπικό επίπεδο. Επιπλέον, οι αξιόπιστες μετρήσεις χιονοκάλυψης παίζουν καταλυτικό ρόλο και για την σωστή λειτουργία των κλιματικών μοντέλων αφού η αλληλεπίδραση χιονοσκεπούς εδάφους με την ατμόσφαιρα είναι ιδιαίτερος σημαντική και επομένως η έλλειψη τους πιθανόν να οδηγεί σε εσφαλμένες προγνώσεις καιρού και κλιματικές

εκτιμήσεις (de Rosnay et al., 2014; Kottek et al., 2006).

Λαμβάνοντας υπόψη τα προαναφερθέντα περι επίδρασης της ύπαρξης ή όχι χιονοκάλυψης, στο περιβάλλον και τις κλιματολογικές του συνθήκες, καθίσταται απαραίτητη η μελέτη αυτών των συνθηκών καθώς και της πιθανής μελλοντικής τους διακύμανσης.

Στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας, η χιονοκάλυψη αποτελεί βασικό πυλώνα εμπλουτισμού του υδροφόρου ορίζοντα καθώς και της τροφοδοσίας των υδάτινων πόρων που αξιοποιούνται για χρήση και κατανάλωση. Υπό την επιρροή της κλιματικής αλλαγής, οι προαναφερθέντες πόροι υφίστανται σημαντικές αλλαγές, ειδικά αν η τροφοδοσία τους προέρχεται αποκλειστικά από την τήξη του εποχιακού χιονιού σε περιοχές μεγάλου υψομέτρου (Fayad et al., 2017). Η Ελλάδα, ούσα μια κατεξοχήν ορεινή χώρα, αφενός τροφοδοτείται με νερό από τις πηγές των μεγάλων ορεινών όγκων και αφετέρου οφείλει ένα μεγάλο κομμάτι του τουρισμού της στους χειμερινούς προορισμούς και τα χιονοδρομικά κέντρα, επομένως η μεταβολή της χιονοκάλυψης σε αυτές τις περιοχές αναμένεται να δράσει καταλυτικά ως προς την λειτουργική και οικονομική βιωσιμότητα των περιοχών αυτών. Συνυπολογίζοντας τις παραπάνω διαπιστώσεις και λαμβάνοντας υπόψη την ευαλωτότητα της Νότιας Ευρώπης στην κλιματική θέρμανση και την παρατηρούμενη αύξηση των ακραίων καιρικών φαινομένων, η στατιστική ανάλυση των συνθηκών χιονιού και η εκτίμηση της μελλοντικής τους εξέλιξης χρήζει βαθύτερης μελέτης. Η συγκεκριμένη έρευνα λοιπόν, εστιάζοντας στο Νότιο κομμάτι των Βαλκανίων και συγκεκριμένα στην περιοχή της Ελλάδας και πραγματεύεται, αρχικά, την κλιματολογία και την διαχρονική τάση της έκτασης και της διάρκειας της χιονοκάλυψης, καθώς και του ύψους χιονιού, για την χρονική περίοδο 1991-2020 και στην συνέχεια τις προβλεπόμενες κλιματικές συνθήκες χιονοκάλυψης για την περίοδο 2031-2060, βασιζόμενη στις προγνώσεις επιλεγμένων κλιματικών μοντέλων.

Η εκτίμηση των μελλοντικών συνθηκών, βασίζεται σε δύο εναλλακτικά σενάρια μεταβολής της επιπλέον ενέργειας που παγιδεύεται στην ατμόσφαιρα, που έχουν υιοθετηθεί στο πλαίσιο της πέμπτης έκθεσης του IPCC (AR5), τα λεγόμενα Representative Concentration Pathways (RCPs). Τα RCPs αποτελούν πρότυπα

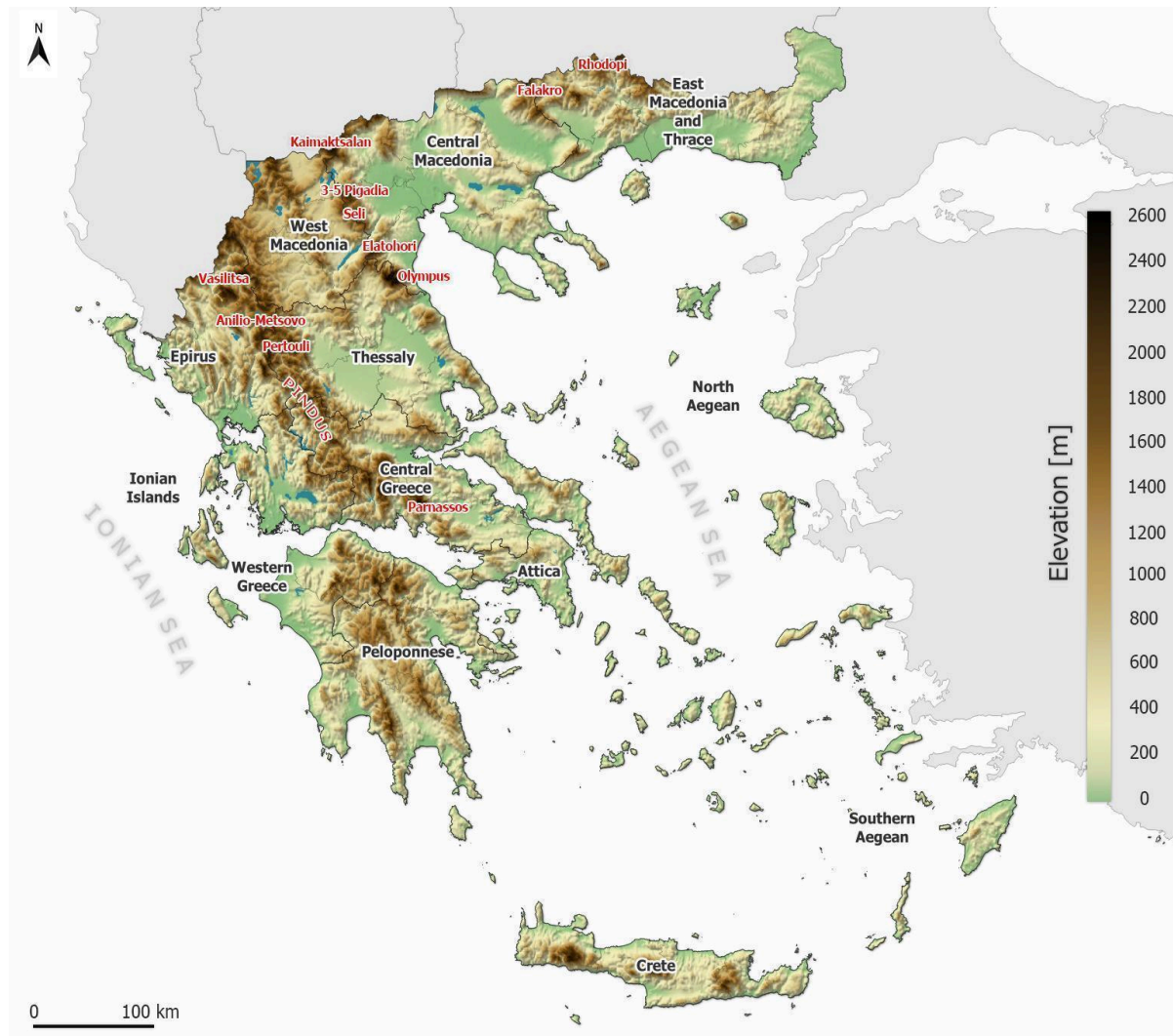
σενάρια που περιγράφουν πιθανές μελλοντικές εξελίξεις στις συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου και στους παράγοντες που επηρεάζουν το ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη, μέσω της μεταβολής του πλεονάσματος της ακτινοβολίας (radiative forcing), με μονάδα μέτρησης τα W/m^2 . Στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιούνται τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5, που αντιστοιχούν σε σενάρια μεσαίας και υψηλής επιβάρυνσης αντίστοιχα. Η χρήση αυτών των δύο σεναρίων επιτρέπει τη διερεύνηση της πιθανής μελλοντικής εξέλιξης της χιονοκάλυψης τόσο υπό ήπιες όσο και υπό ακραίες κλιματικές μεταβολές.

2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Δεδομένα

2.1.1. Παρόν κλίμα

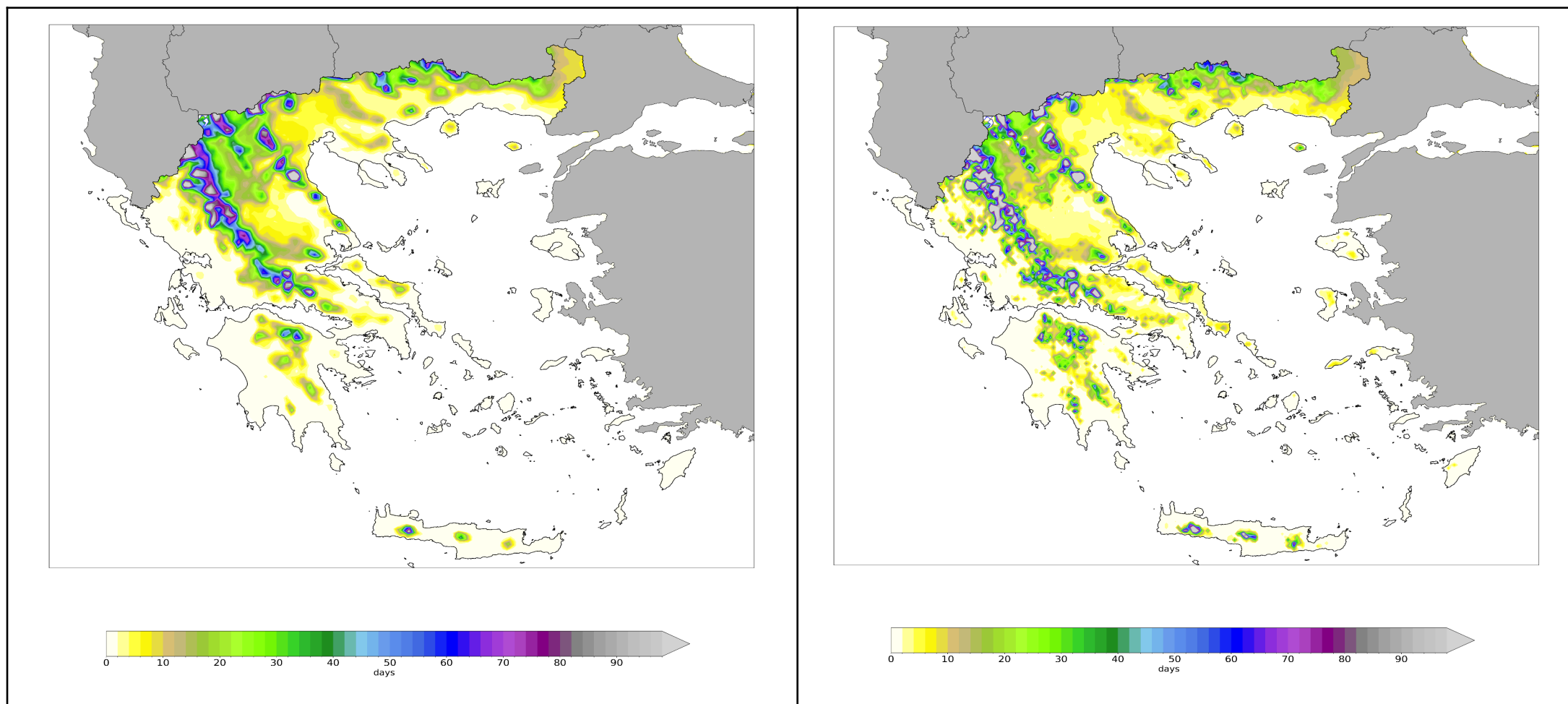
Όπως προαναφέρθηκε, η συγκεκριμένη μελέτη εστιάζει στην περιοχή της Ελλάδας, και πιο συγκεκριμένα στην περιοχή που βρίσκεται εντός ενός πλαισίου με συντεταγμένες από 34.5° έως 42.0° βόρεια και από 18.8° έως 30.0° ανατολικά. Το Σχήμα 1, παρουσιάζει τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της Ελλάδας, τις γεωγραφικά σημαντικές περιοχές καθώς και τα χιονοδρομικά της χώρας που μελετήθηκαν ιδιαίτερα. Η γεωγραφική θέση της Ελλάδας ανάμεσα από την αφρικανική ήπειρο και την σιβηρία, σε συνδυασμό με τα υψηλά ποσοστά υγρασίας λόγω της Μεσογείου θάλασσας, της προσδίδει μια ιδιαίτερη κλιματική συμπεριφορά. Σε αυτό συμβάλλουν σημαντικά και οι ορεινοί όγκοι στον ηπειρωτικό κορμό της χώρας (Tziallas, 2015) οι οποίοι επηρεάζουν την γεωγραφική κατανομή του υετού και της θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα οι κλιματικές περιοχές στην Ελλάδα χωρίζονται σε 3 βασικές ζώνες (Feidas et al., 2007), την αλπική, την εύκρατη και την μεσογειακή. Αναλυτικότερα, η αλπική ζώνη χαρακτηρίζει τις περιοχές μεγάλου υψομέτρου όπου παρουσιάζονται χαμηλές θερμοκρασίες με συχνές χιονοπτώσεις κατά την χειμερινή περίοδο και μεγάλες περίοδοι χιονοκάλυψης. Η εύκρατη ζώνη εντοπίζεται στα χαμηλά υψόμετρα της βόρειας και κεντρικής Ελλάδας και παρουσιάζει γενικά πιο ήπιες εποχιακές διακυμάνσεις τόσο ως προς την θερμοκρασία, όσο και ως προς τον υετό. Τέλος, η ζώνη μεσογειακού κλίματος εντοπίζεται στην νότια και νησιωτική χώρα και διακρίνεται κυρίως από τα θερμά και ξηρά καλοκαίρια και τους υγρούς και ήπιους θερμοκρασιακά χειμώνες.



Σχήμα 1. Χάρτης της περιοχής ενδιαφέροντος (Ελλάδα).

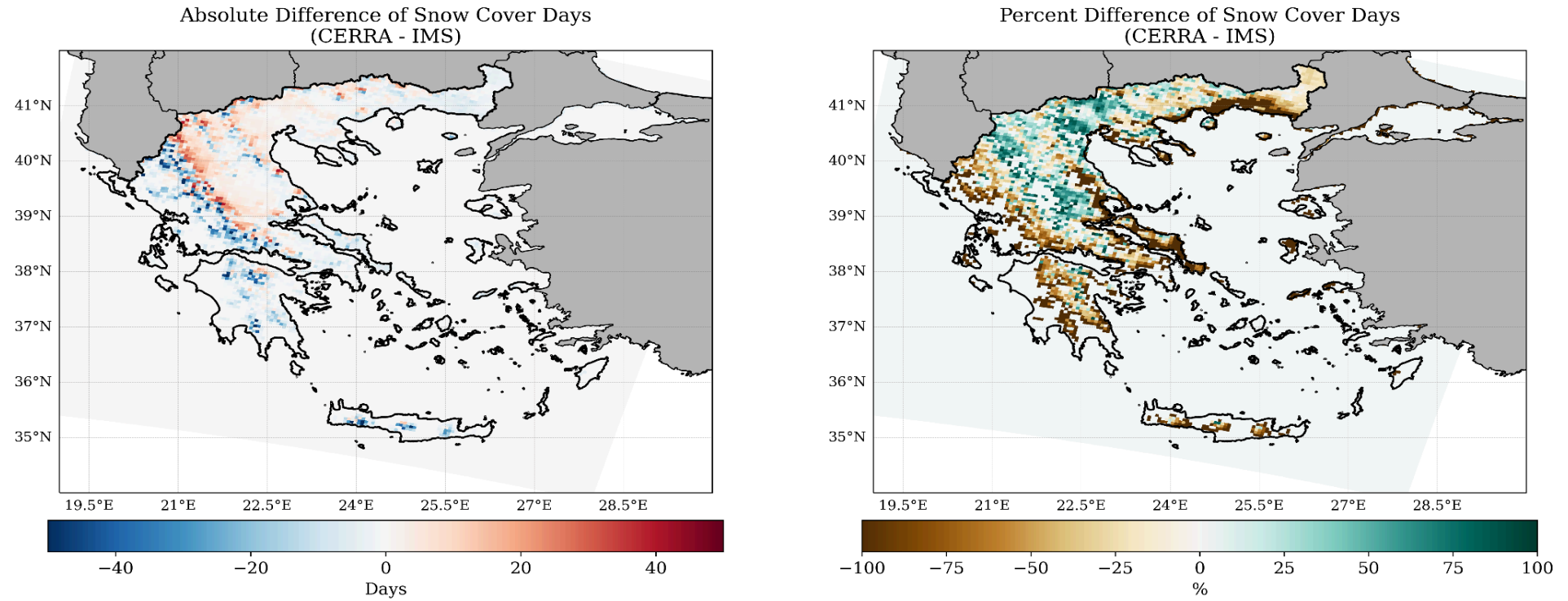
Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα έρευνα είναι οι τιμές του μέγιστου ημερήσιου ύψους χιονιού για κάθε ημέρα της περιόδου 1991-2020 και αντλήθηκαν από το μοντέλο reanalysis CERRA-Land (Copernicus European Regional RE-Analysis Land) (Verelle et al., 2022). Από αυτές τις τιμές εξήχθησαν πληροφορίες για την διάρκεια χιονοκάλυψης χωρικά και διαχρονικά, θεωρώντας ως ημέρα χιονοκάλυψης τις ημέρες όπου το μέγιστο ημερήσιο ύψος χιονιού υπερβαίνει τα 2 εκατοστά. Τα δεδομένα χιονοκάλυψης συγκρίθηκαν ποιοτικά και ποσοτικά με τα δορυφορικά δεδομένα χιονοκάλυψης από τον δορυφόρο IMS (Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System) ανάλυσης 4 χιλιομέτρων που αντλήθηκαν από το National Oceanic and Atmospheric Administration's National Environmental Satellite Data and Information Service (NOAA/NESDIS) (Mazari et al., 2013; Sönmez et al., 2014) για να αξιολογηθεί η αξιοπιστία των τιμών. Η σύγκριση των δύο σειρών δεδομένων έγινε για την κοινή χρονική περίοδο δεδομένων από το 2005 έως το 2020 και διαπιστώθηκε πως η χωρική κατανομή της χιονοκάλυψης του μοντέλου CERRA-Land παρουσιάζει σημαντική ταύτιση με τις δορυφορικές μετρήσεις για τον αριθμό ημερών με ύψος χιονιού μεγαλύτερο των 2 εκατοστών. Στο Σχήμα 2 απεικονίζονται αναλυτικά οι αριθμοί ημερών χιονοκάλυψης με βάση τα δεδομένα Cerra-Land (για ύψος χιονιού >2 εκατοστών) και τις δορυφορικές μετρήσεις του IMS, ενώ στο Σχήμα 3, απεικονίζεται η διαφορά μεταξύ των δύο βάσεων δεδομένων για την περίοδο Σεπτέμβριος-Μάιος κατά αριθμητική και ποσοστιαία τιμή. Οι πιο σημαντικές ποσοστιαίες διαφορές, που πρέπει να αναφερθούν, εντοπίζονται σε περιοχές χαμηλού υψομέτρου στην Θεσσαλία και στην κεντρική Μακεδονία οι οποίες αποτελούν περιοχές με μικρό μέσο αριθμό ημερών με χιονοκάλυψη συνεπώς, ακόμα και μια αποχή λίγων ημερών αντικατοπτρίζεται ως μεγάλο ποσοστό. Στις περιοχές με υψηλό αριθμό ημερών χιονοκάλυψης η ταύτιση είναι πολύ μεγαλύτερη με αποκλίσεις κατά απόλυτη τιμή μικρότερες του 20%. Στα διαγράμματα διασποράς που παρατίθενται είναι εμφανή κάποια μεμονωμένα σημεία του πλέγματος που έχουν μεγάλη απόκλιση μεταξύ των 2 σειρών δεδομένων, κάτι που πιθανόν να οφείλεται, είτε σε κάποιο σφάλμα τιμής, είτε λόγω διαφοράς χωρικής ανάλυσης ανάμεσα στο μοντέλο Cerra-Land και τις δορυφορικές μετρήσεις του IMS (Ridal et al., 2024; Danielson and Gesch, 2011; U.S. National Ice Center, 2008). Ουσιαστικά οι διαφορές χωρικής ανάλυσης των 2 σειρών δεδομένων, επηρεάζουν σημαντικά την αποτύπωση της τοπογραφίας. Επομένως, οι μεγάλες τοπικές διαφορές μπορούν εν μέρει να αποδοθούν σε αυτή την διαφοροποίηση, καθώς η τοπογραφία του CERRA-Land είναι

εξομαλυμένη και δεν αποτυπώνει πλήρως τις μικροκλίμακες των ορεινών περιοχών. Παρ'όλα αυτά η ύπαρξη ερευνών που αξιοποιούν το μοντέλο CERRA-Land υποδεικνύουν υψηλή αξιοπιστία των δεδομένων της εξέλιξης της χιονόστρωσης (Monteiro et al., 2023). Κατά συνέπεια η χρήση των συγκεκριμένων δεδομένων προσδίδουν μια ικανοποιητική προσέγγιση στην κλιματολογία του χιονιού στην Ελλάδα.

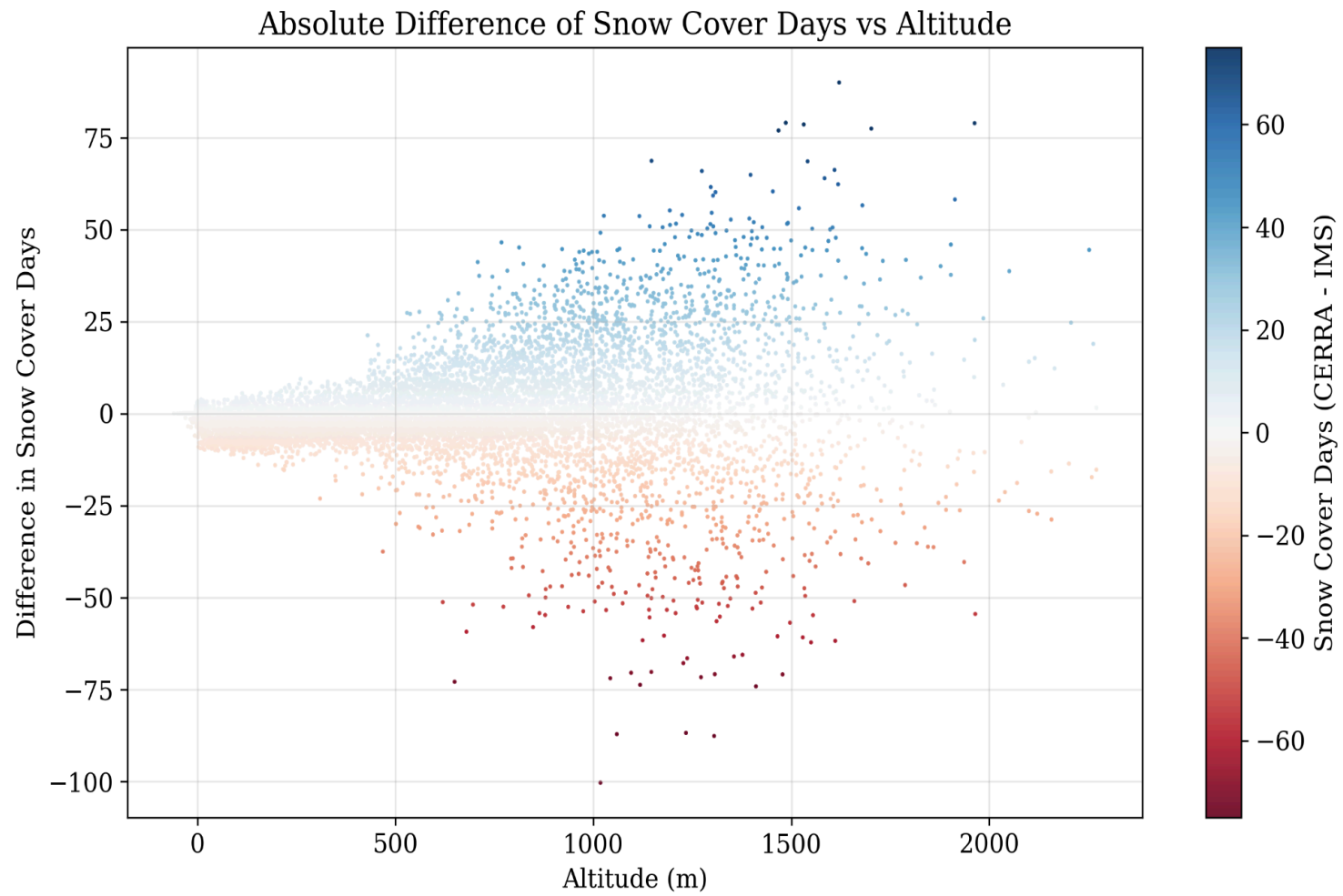


Σχήμα 2. Διάρκεια χιονοκάλυψης σε ημέρες με βάση τα δεδομένα από το μοντέλο Cerra-Land (αριστερά) και τις δορυφορικές μετρήσεις IMS (δεξιά), για την χειμερινή περίοδο Σεπτέμβριος- Μάιος και για την περίοδο 2005-2020.

Comparison of Snow Cover Days between CERRA-Land and IMS
Period: 2005-2020



Σχήμα 3. Σύγκριση τιμών του μέσου ετήσιου αριθμού με χιονοκάλυψη μεταξύ των Cerra-Land και IMS ως αριθμητική διαφορά (αριστερά) και ως ποσοστιαία διαφορά (δεξιά) για την χειμερινή περίοδο Σεπτέμβριος- Μάιος, για την περίοδο 2005-2020.



Εικόνα 4. Σύγκριση των τιμών Cerra-Land και IMS σε σχέση με το υψόμετρο του σημείου πλέγματος.

2.1.2. Μελλοντικό κλίμα

Η παρούσα μελέτη διερευνά επίσης, τις πιθανές μελλοντικές μεταβολές της χιονοκάλυψης στην Ελλάδα υπό συνθήκες κλιματικής αλλαγής, αξιοποιώντας δεδομένα από το EURO-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment – European Domain), το οποίο αποτελεί το ευρωπαϊκό σκέλος της διεθνούς πρωτοβουλίας CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment). Η πρωτοβουλία αυτή στοχεύει στην παραγωγή περιοχικών κλιματικών προβλέψεων υψηλής ανάλυσης για την υποστήριξη μελετών εκτίμησης επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής (Jacob et al., 2014; Giorgi and Gutowski, 2015).

Για αυτή την εργασία, αξιοποιήθηκαν οκτώ προσομοιώσεις περιοχικών κλιματικών μοντέλων (Regional Climate Models – RCMs), οι οποίες συνδυάζουν τρία διαφορετικά RCMs με τέσσερα παγκόσμια κλιματικά μοντέλα (Global Climate Models – GCMs), όπως συνοψίζεται στον Πίνακα 1. Οι προσομοιώσεις αυτές καλύπτουν δύο αντιπροσωπευτικά σενάρια συγκέντρωσης αερίων του θερμοκηπίου (RCPs) που χρησιμοποιήθηκαν από την IPCC στην Πέμπτη Έκθεση Αξιολόγησης (AR5):

- το RCP4.5, ένα μετριοπαθές σενάριο σταθεροποίησης της επιπλέον ενέργειας που παγιδεύεται στην ατμόσφαιρα, στους $\sim 4.5 \text{ W/m}^2$ έως το 2100,
- και το RCP8.5, ένα σενάριο υψηλών εκπομπών που οδηγεί σε πλεόνασμα ενέργειας $\sim 8.5 \text{ W/m}^2$ μέχρι το τέλος του αιώνα (van Vuuren et al., 2011).

Η χωρική ανάλυση των προσομοιώσεων είναι $\sim 0.11^\circ$ ($\sim 11 \text{ km}$), ενώ η ανάλυση επικεντρώνεται στην μεταβλητή του ύψους χιονιού, την χιονοκάλυψη (ύψος χιονιού $> 0 \text{ cm}$) καθώς και σε χιονομετρικούς δείκτες που ορίζονται ως κατώφλια ύψους χιονιού. Η ανάλυση γίνεται για δύο περιόδους 30 ετών:

- την περίοδο αναφοράς 1991–2020,
- και τη μελλοντική περίοδο 2031–2060.

Η χρήση πολυάριθμων μοντέλων (RCM-GCM combinations) ενισχύει τη στατιστική

αξιοπιστία της εκτίμησης, καθώς επιτρέπει την ανάλυση του φάσματος της κλιματικής αβεβαιότητας που προκύπτει τόσο από τη διαμόρφωση των μοντέλων όσο και από τις αρχικές/οριακές τους συνθήκες (ensemble approach).

Πίνακας 1. Κλιματικές προσομοιώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την προσδιορισμό των μελλοντικών συνθηκών χιονιού για τη περίοδο 2031-2060.

Ακρωνύμιο	Ινστιτούτο	RCM	Ινστιτούτο	GCM
CRNM-CLMCom	CLMcom	CCLM4-8-17	CNRM-CERFACS	CNRM-CM5
CRNM-KNMI	KNMI	RACMO22E	CNRM-CERFACS	CNRM-CM5
EC-EARTH-KNMI	KNMI	RACMO22E	ICHEC	EC-EARTH-r1i1p1
EC-EARTH-KNMI	KNMI	RACMO22E	ICHEC	EC-EARTH-r12i1p1
EC-EARTH-RCA	SMHI	RCA4	ICHEC	EC-EARTH
HadGEM-RACMO	KNMI	RACMO22E	MOHC	HadGEM2-ES
HadGEM-RCA	SMHI	RCA4	MOHC	HadGEM2-ES
MPI-CCLM4-8-17	CLMcom	CCLM4-8-17	MPI-M	MPI-ESM-LR

2.2. Μεθοδολογία

2.2.1. Συνθήκες χιονιού στο παρόν κλίμα

Για την εξαγωγή των παρόντων κλιματικών συνθηκών χιονιού, αρχικά υπολογίστηκαν ο μέσος όρος του ύψους χιονιού καθώς και η μέση έκταση και διάρκεια της χιονοκάλυψης κατά την διάρκεια της 30ετίας 1991-2020, τόσο για όλη την διάρκεια

της ψυχρής περιόδου (Σεπτέμβριος - Μάιος), όσο και εποχιακά και μηνιαία. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως όσον αφορά το μέσο ύψος χιονιού, οι χάρτες που παρουσιάζονται, αφορούν την περίοδο Δεκεμβρίου - Μαρτίου καθώς οι μήνες Σεπτέμβριος, Οκτώβριος, Νοέμβριος, Απρίλιος και Μάιος παρουσιάζουν πολύ χαμηλές έως και μηδενικές τιμές βάθους χιονιού συμβάλλοντας αισθητά και στην ελάττωση της μέσης τιμής, καθιστώντας δύσκολη την διάκριση των τιμών και των αποκλίσεων. Παράλληλα, για κάθε μήνα και περίοδο του έτους, υπολογίστηκαν οι αποχές των αντίστοιχων τιμών από την μέση κλιματική τιμή, ενώ βρέθηκαν και οι αντίστοιχες αποκλίσεις για κάθε δεκαετία ξεχωριστά (1991-2000, 2001-2010, 2011-2020) για την πιο λεπτομερή μελέτη της εξέλιξης της χιονοκάλυψης διαχρονικά. Στην συνέχεια προσδιορίστηκε η διαχρονική τάση τόσο του ύψους χιονιού όσο και της χιονοκάλυψης δίνοντας έμφαση στα σημεία που υφίστανται στατιστικά σημαντικές μεταβολές, χρησιμοποιώντας το τεστ Mann-Kendall. Η παραπάνω ανάλυση έγινε για όλη την περιοχή της Ελλάδας, αλλά και για συγκεκριμένα σημεία του πλέγματος που βρίσκονται κοντά σε σημαντικά χιονοδρομικά κέντρα της χώρας.

2.2.2. Συνθήκες χιονιού στο μελλοντικό Κλίμα

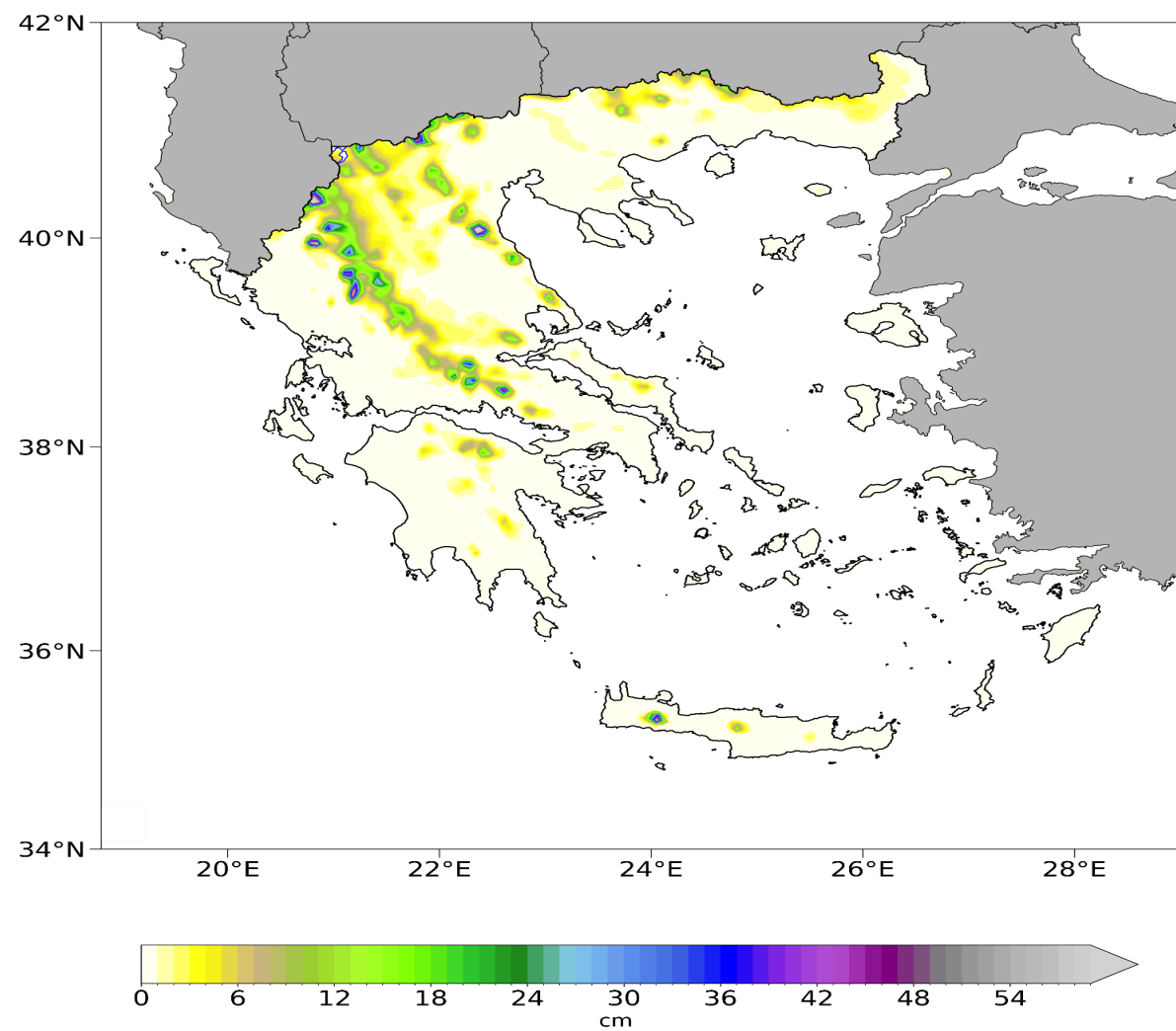
Όσον αφορά την σύγκριση του παρόντος κλίματος με το μελλοντικό, προσδιορίστηκε ξανά το παρόν κλίμα όπως προηγουμένως αλλά αντλώντας τα δεδομένα των κλιματικών προσομοιώσεων που προαναφέρθηκαν, υπολογίζοντας τις μέσες τιμές ύψους χιονιού, διάρκειας χιονοκάλυψης και χιονομετρικών δεικτών εποχιακά και μηνιαία. Οι ίδιοι υπολογισμοί επαναλήφθηκαν και για την περίοδο 2031-2060 και έπειτα εξήχθησαν οι αποχές των προβλεπόμενων τιμών της περιόδου 2031-2060 από τις κλιματικές τιμές του παρόντος. Η χιονοκάλυψη αφορά τις ημέρες με ύψος χιονιού >0 cm ενώ οι χιονομετρικοί δείκτες που ορίστηκαν ως κατώφλια αφορούσαν τα ύψη χιονιού : ≥ 5 cm, ≥ 30 cm και ≥ 50 cm. Η διάρκεια χιονοκάλυψης και οι δείκτες, υπολογίζονται ως ο μέσος αριθμός ημερών ανά έτος για τις οποίες το ύψος χιονιού υπερβαίνει τα εν λόγω κατώφλια. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε πάλι στα χιονοδρομικά κέντρα για να ελεγχθεί η βιωσιμότητα τους υπό το πρίσμα της αλλαγής κλίματος.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ– ΣΥΖΗΤΗΣΗ

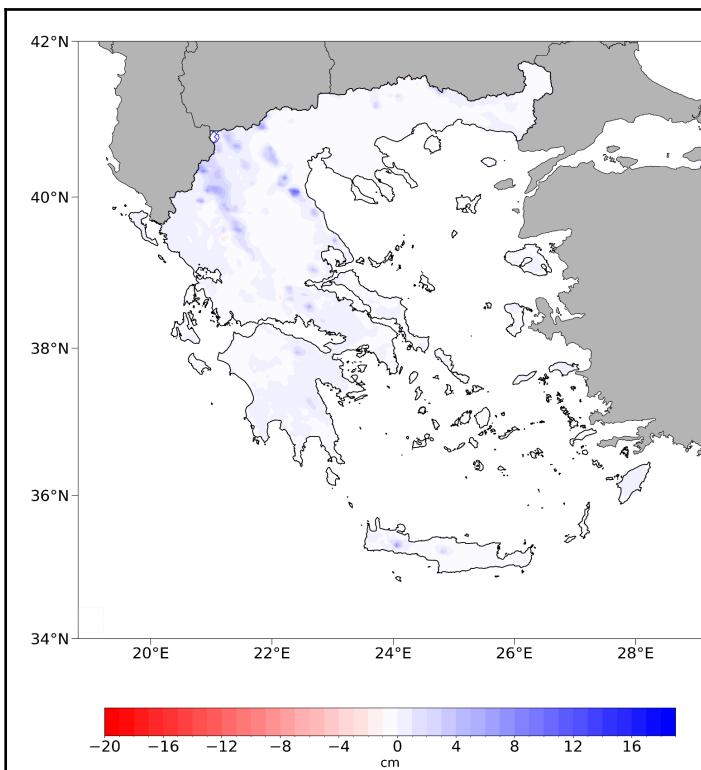
3.1 Χαρακτηριστικά χιονοκάλυψης στο παρόν κλίμα

3.1.1 Ύψος χιονιού

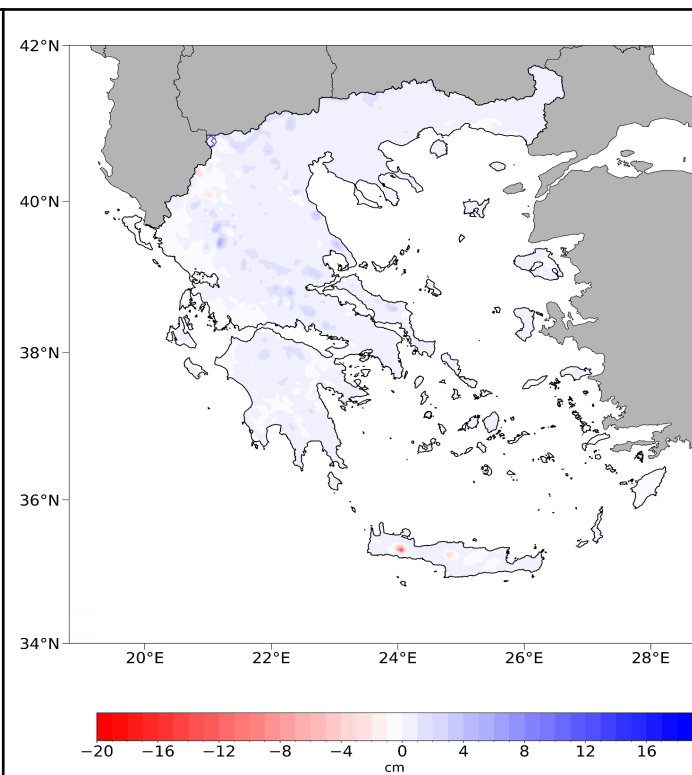
Η κλιματολογία του μέσου βάθους χιονιού της Ελλάδας για την περίοδο Δεκεμβρίου-Μαρτίου όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5, αποτυπώνεται με τα μεγαλύτερα ύψη χιονιού να καταγράφονται κυρίως στην βόρεια και βορειοδυτική Ελλάδα και να περιορίζονται σε ορεινές και ημιορεινές περιοχές της κεντρικής και νότιας χώρας αλλά και τα μεγάλα υψόμετρα της Κρήτης. Πιο συγκεκριμένα, σε υψόμετρα της βορειοδυτικής Ελλάδας και της Κρήτης μεγαλύτερα των 1800 μέτρων, το μέσο ύψος χιονιού της περιόδου Σεπτεμβρίου - Μαΐου, φαίνεται να υπερβαίνει τα 50 εκατοστά, ενώ στις περιοχές με υψόμετρο 1000-1500 μέτρα, το μέσο ύψος χιονιού κυμαίνεται από 10 έως και 30 εκατοστά σε όλη σχεδόν την έκταση της χώρας. Στα Σχήματα 6α έως 6ζ παρουσιάζεται η αποχή του μέσου ύψους χιονιού της κάθε δεκαετίας για την συγκεκριμένη περίοδο του έτους τόσο αριθμητικά, όσο και ποσοστιαία. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούμε το θετικό πρόσημο της αποχής τις δεκαετίες 1991-2000 και 2001-2010 και το έντονο αρνητικό πρόσημο την τελευταία δεκαετία (2011-2020) σε όλους τους ορεινούς όγκους με εξαίρεση τα μεγάλα υψόμετρα της Κρήτης. Στα ορεινά της κεντρικής και βόρειας Ελλάδας, η μείωση του μέσου ύψους χιονιού κατά την τελευταία δεκαετία αγγίζει έως και τα 15 εκατοστά και μεταφράζεται σε ποσοστό έως και 50%. Στην Κρήτη σε υψόμετρα >1900 μέτρα παρατηρείται μια αύξηση έως και 20% του μέσου ύψους χιονιού κατά την τελευταία δεκαετία σε σύγκριση με την κλιματική τιμή.



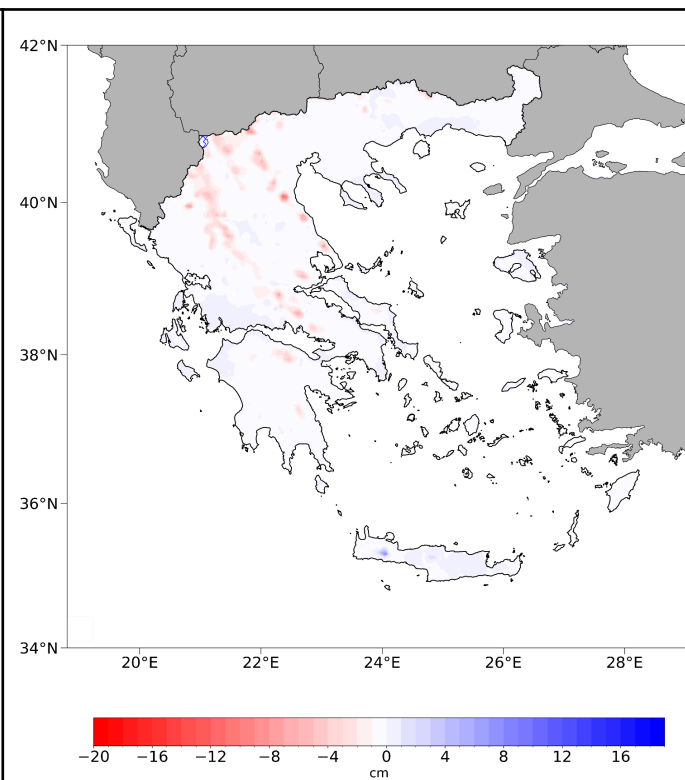
Σχήμα 5. Χάρτης μέσου ημερήσιου ύψους χιονιού για την περίοδο Δεκέμβριος - Μάρτιος κατά τα έτη 1991-2020.



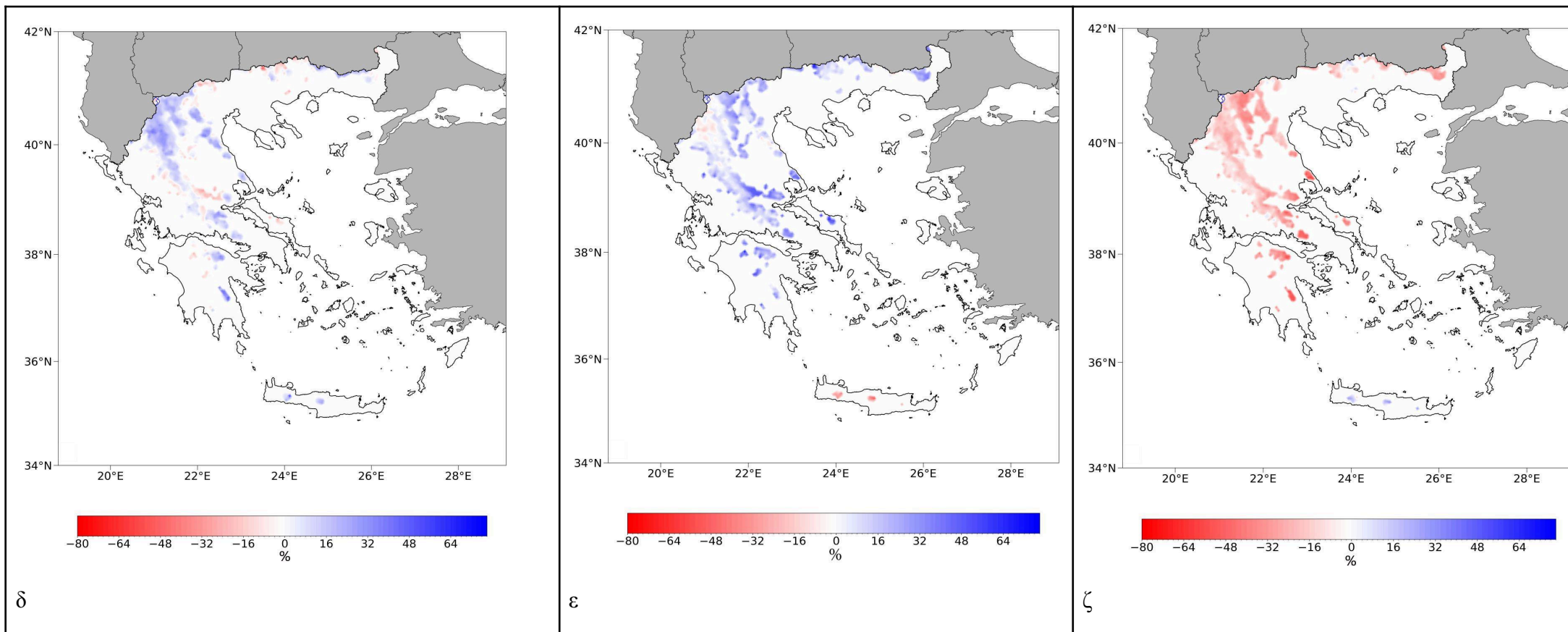
α



β

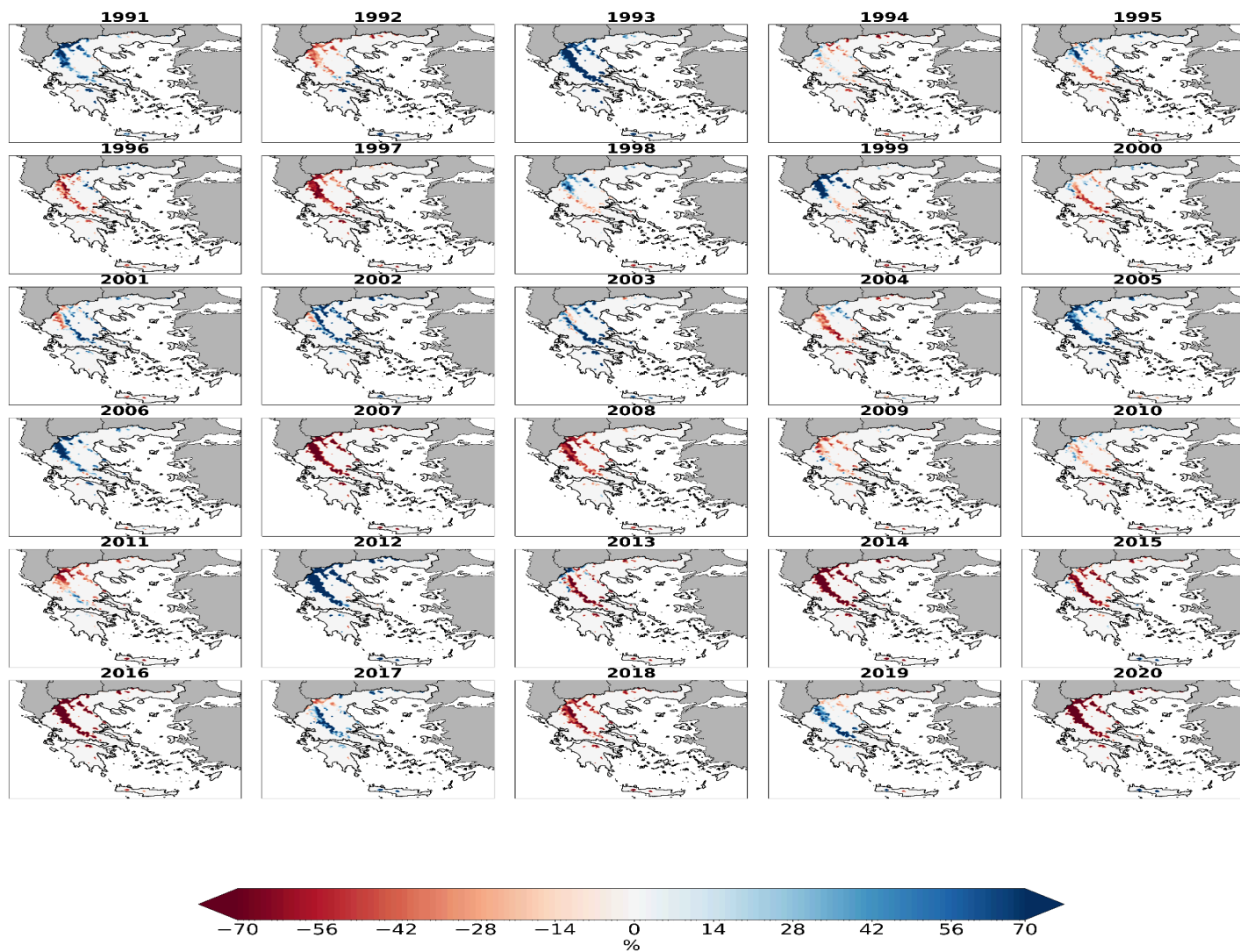


γ



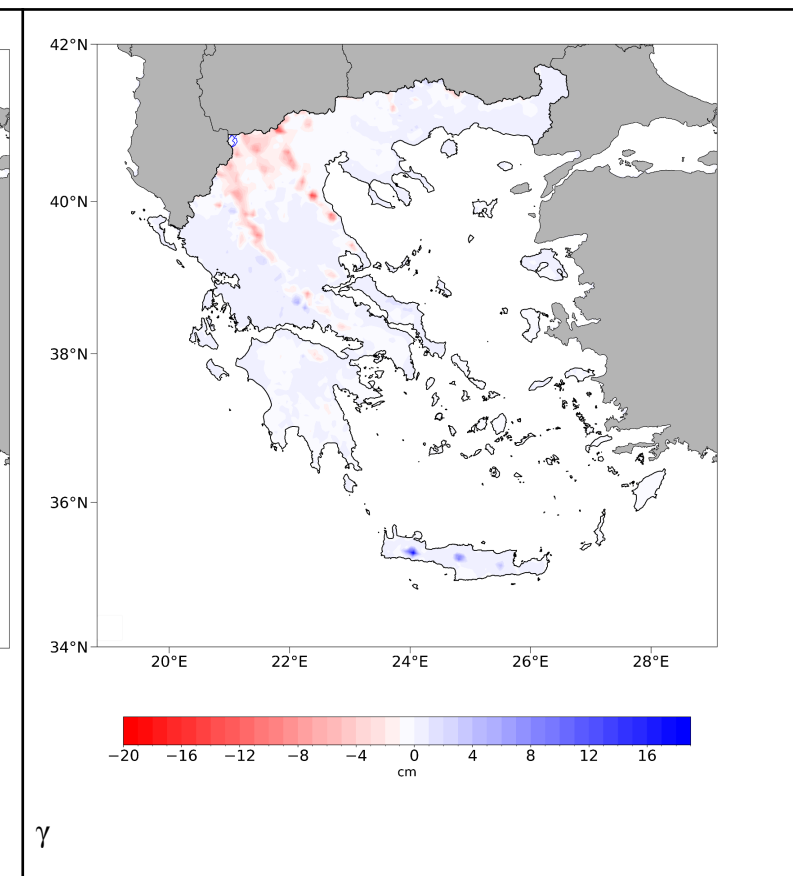
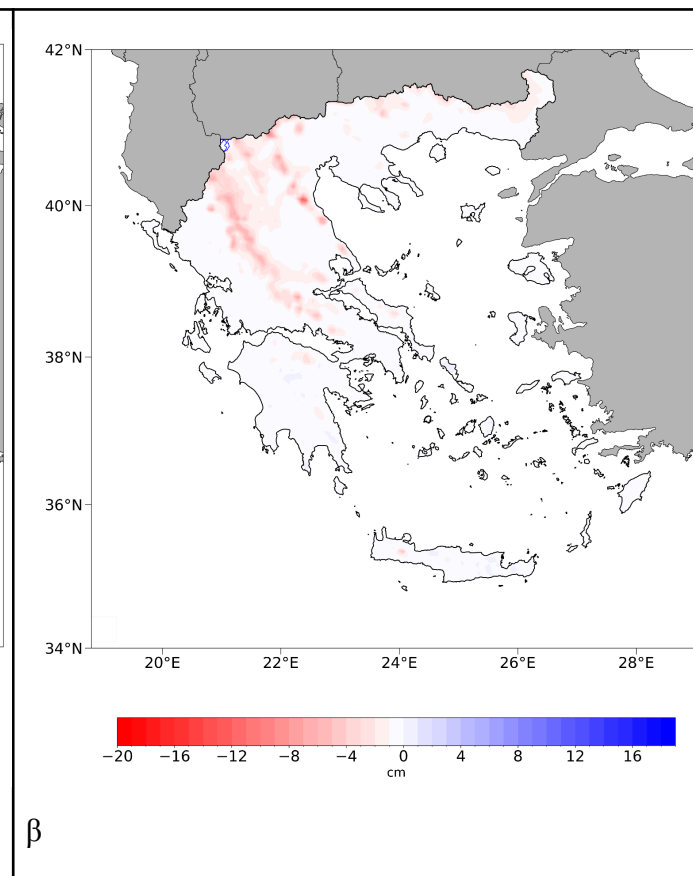
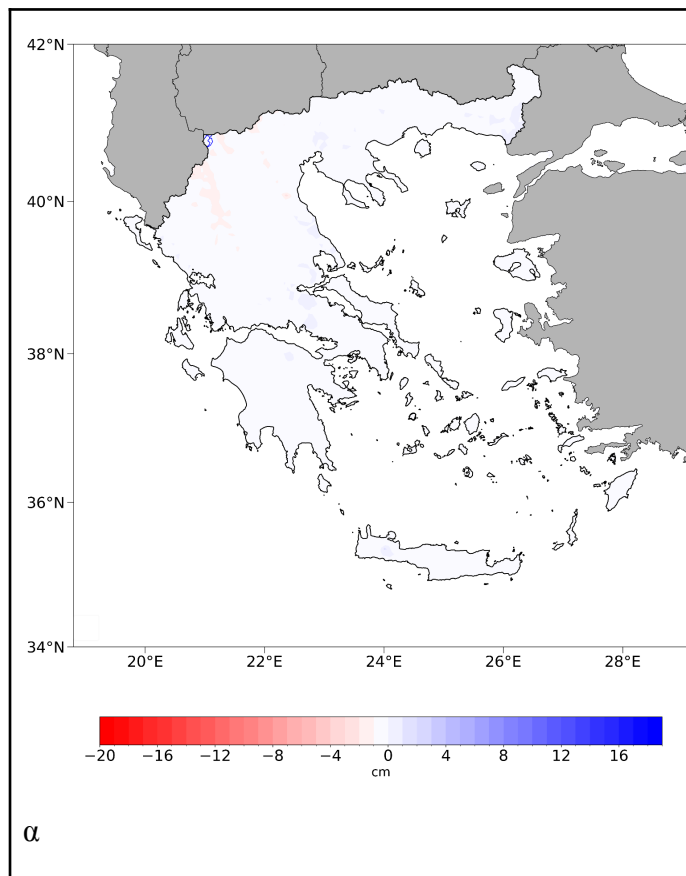
Σχήμα 6. Χάρτες αποχών του μέσου ημερήσιου ύψους χιονιού ανα δεκαετία αριθμητικά (α) 1991-2000, (β) 2001-2010, (γ) 2011-2020 και ποσοστιαία (δ) 1991-2000, (ε) 2001-2010, (ζ) 2011-2020 για την περίοδο Δεκέμβριος - Μάρτιος.

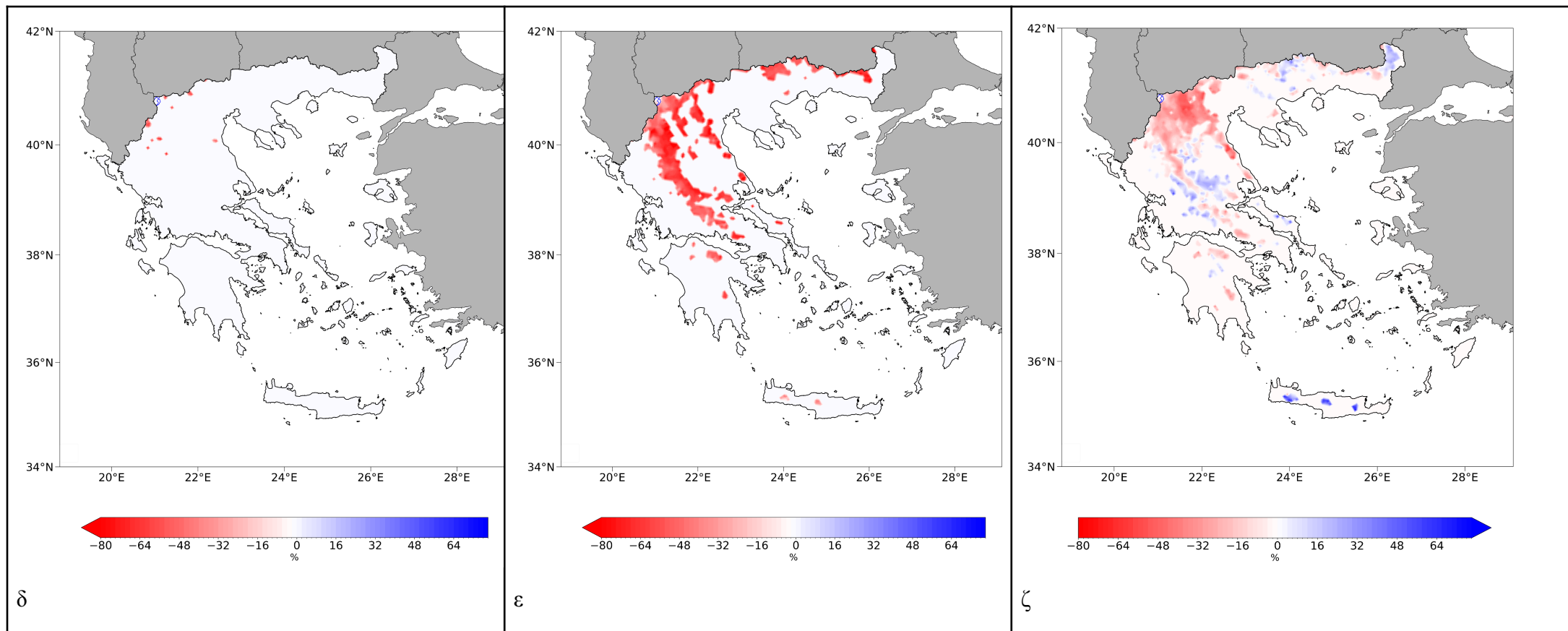
Στο Σχήμα 7, απεικονίζονται αναλυτικά οι αποχές του μέσου ύψους χιονιου της περιόδου Δεκέμβριος-Μάρτιος για κάθε έτος της τριαντακονταετίας σε σύγκριση με την μέση κλιματική τιμή. Στην περίοδο 1991-2005 παρουσιάζονται τόσο έτη με αρνητική αποχή (1992,1996,1997,2000,2004) όσο και έτη με θετική αποχή (1991,1993,1999,2002,2003,2005) υποδεικνύοντας έτσι μια σχετική σταθερότητα. Περνώντας στο 2ο μισό της συνολικής περιόδου (2006-2020) παρατηρείται η έλλειψη ετών με θετική αποχή καθώς η πλειοψηφία των ετών (11 από τα 15) χαρακτηρίζεται από αρνητικές αποχές με τις μεγαλύτερες να εντοπίζονται τα έτη 2007, 2014, 2015, 2016 και 2020 αγγίζοντας ποσοστά έως και 70%.



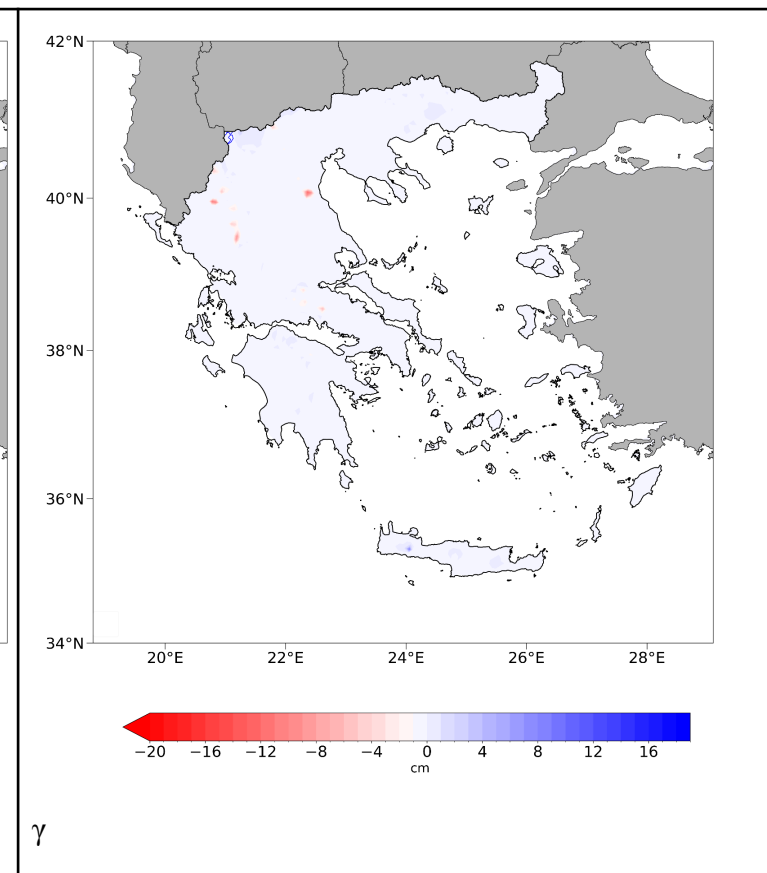
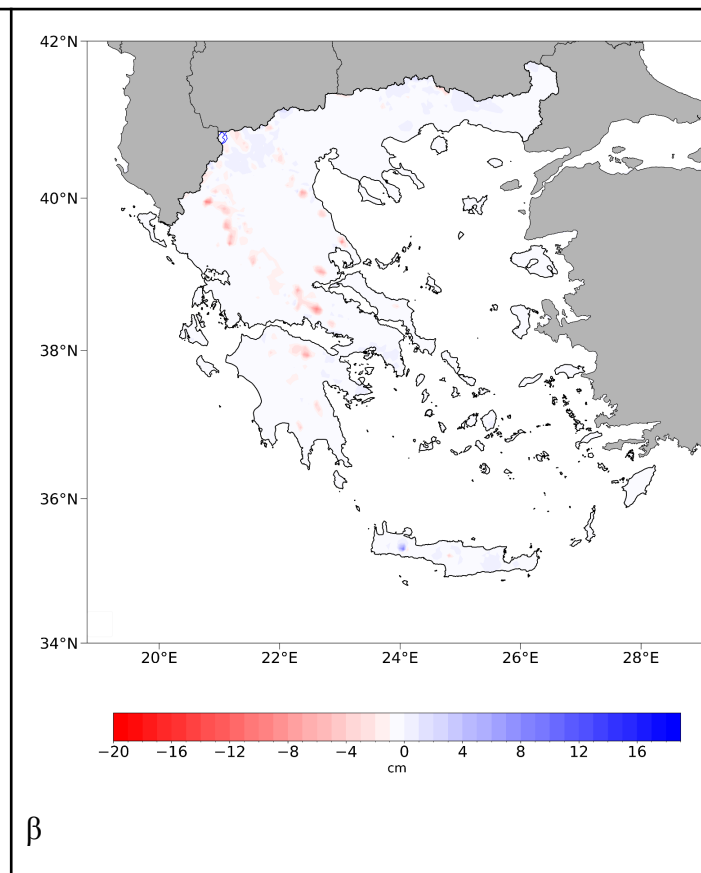
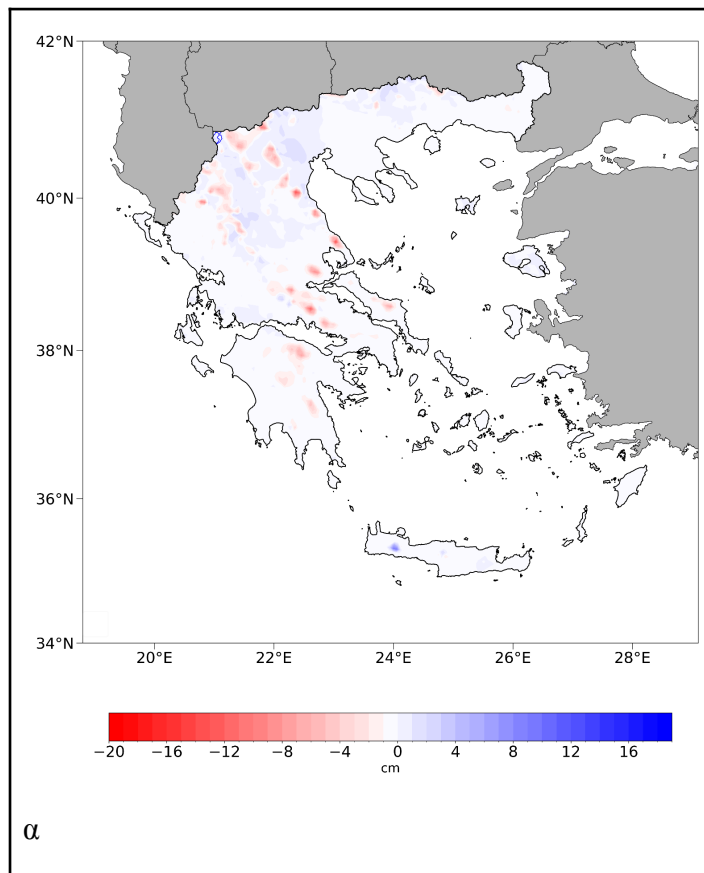
Σχήμα 7. Χάρτες Αποχών μέσου ημερήσιου ύψους χιονιού της περιόδου Δεκέμβριος - Μάρτιος ανά έτος, κατά την 30ετία 1991-2020.

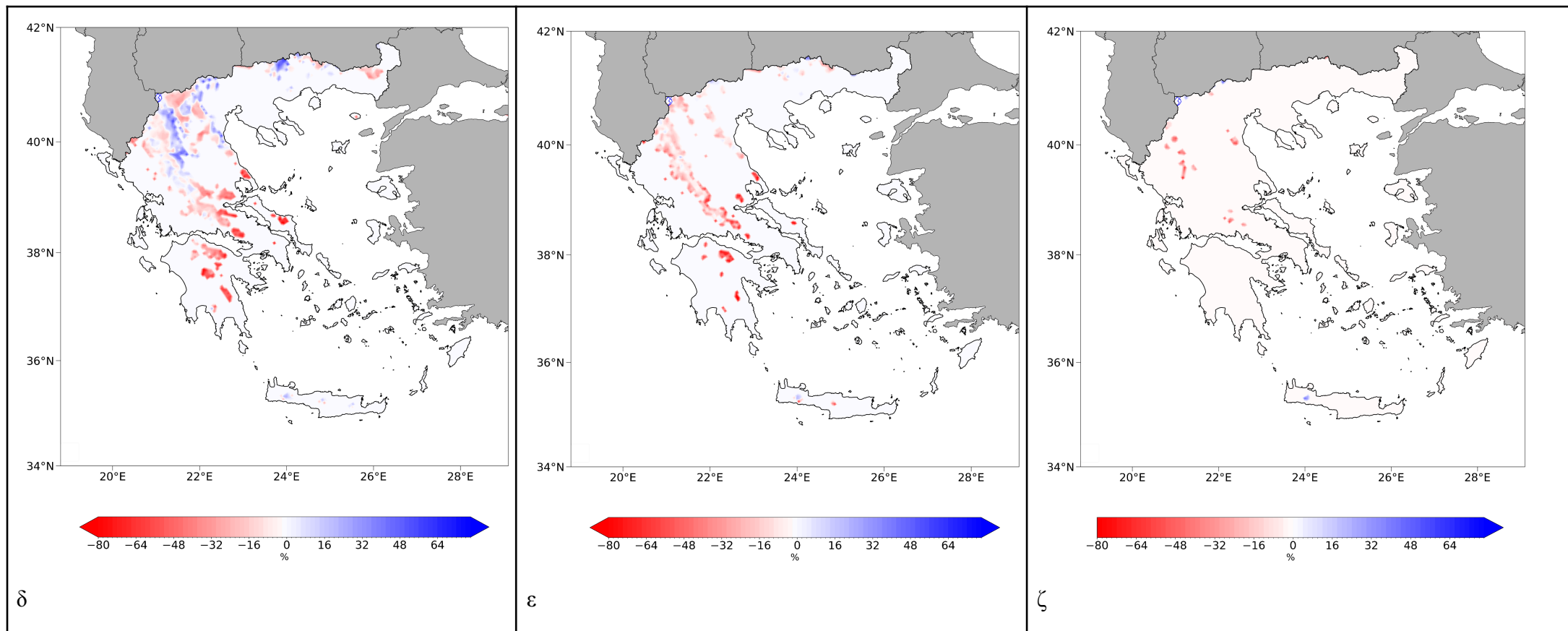
Έπειτα, πραγματοποιήθηκε η αντίστοιχη ανάλυση ανα δεκαετία σε μηνιαία βάση για να εντοπιστεί ποια περίοδος του έτους παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στην παγκόσμια θέρμανση. Στα επόμενα Σχήματα ωστόσο παρατίθενται οι αποχές ανά μήνα μόνο για τη δεκαετία 2011-2020, η οποία παρουσιάζει τις σημαντικότερες αποκλίσεις σε σχέση με τον μέσο όρο. Οι μήνες που επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν στην εργασία είναι αυτοί κατά τους οποίους το μέσο ύψος χιονιού ήταν τέτοιο ώστε οι αποχές να μπορούν να απεικονιστούν ευδιάκριτα σε χάρτες. Κατα συνέπεια, στα Σχήματα 8 και 9, παρουσιάζονται οι αποχές των μηνών Νοέμβριος-Απρίλιος της τελευταίας δεκαετίας σε σύγκριση με την μέση κλιματική τιμή. Τα ευρήματα υποδεικνύουν την σημαντική ελάττωση τους μέσου ύψους χιονιού όλους τους μήνες στις ορεινές και ημιορεινές περιοχές ενώ στα πεδινά τμήματα τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο παρουσιάστηκαν τοπικά, κάποιες ελαφρώς θετικές αποκλίσεις. Οι θετικές αυτές αποκλίσεις οφείλονται σε μεμονωμένα εξαιρετικά ισχυρά κύματα ψύχους που εκδηλώθηκαν στην Βαλκανική χερσόνησο κατά τους χειμώνες 2011-2012, 2016-2017 και 2018-2019 (Anagnostopoulou et al., 2017; Kömüscü et al., 2021; Tringa et al., 2022). Πιο συγκεκριμένα, η σημαντικότερη μείωση παρατηρείται κατά το μήνα Δεκέμβριο σε όλη την έκταση της Ελλάδας και κυρίως στις ορεινές περιοχές, αγγίζοντας και ποσοστά έως και $<-80\%$ σε περιοχές της βορειοδυτικής χώρας. Τον Ιανουάριο, είναι εμφανείς οι αρνητικές αποχές στο μεγαλύτερο μέρος της βόρειας και κεντρικής χώρας που αγγίζουν ποσοστά έως και -40% ενώ τον μήνα Φεβρουάριο εμφανίζεται μια μικρή αύξηση στα χαμηλά υψόμετρα της Μακεδονίας και μια εμφανή μείωση στα ορεινά όλης της επικράτειας. Τέλος, τους μήνες Μάρτιο και Απρίλιο εμφανίζονται σχεδόν αποκλειστικά αρνητικές μεταβολές (έως -50%), οι οποίες περιορίζονται αρχικά σε υψόμετρα μεγαλύτερα των 1000 μέτρων τον Μάρτιο, και μεγαλύτερα των 1500 μέτρων τον Απρίλιο. Εξαίρεση αποτελούν οι κορυφές των βουνών της δυτικής Κρήτης όπου φαίνεται μια τοπική αύξηση.





Σχήμα 8. Χάρτες αποχών από τις κλιματικές τιμές μέσου ημερήσιου ύψους χιονιού, σε αριθμητική (α,β,γ) και ποσοστιαία μορφή (δ,ε,ζ), κατά την δεκαετία 2011-2020, , κατά τους μήνες Νοέμβριο (α,δ), Δεκέμβριο (β,ε) και Ιανουάριο (γ,ζ).





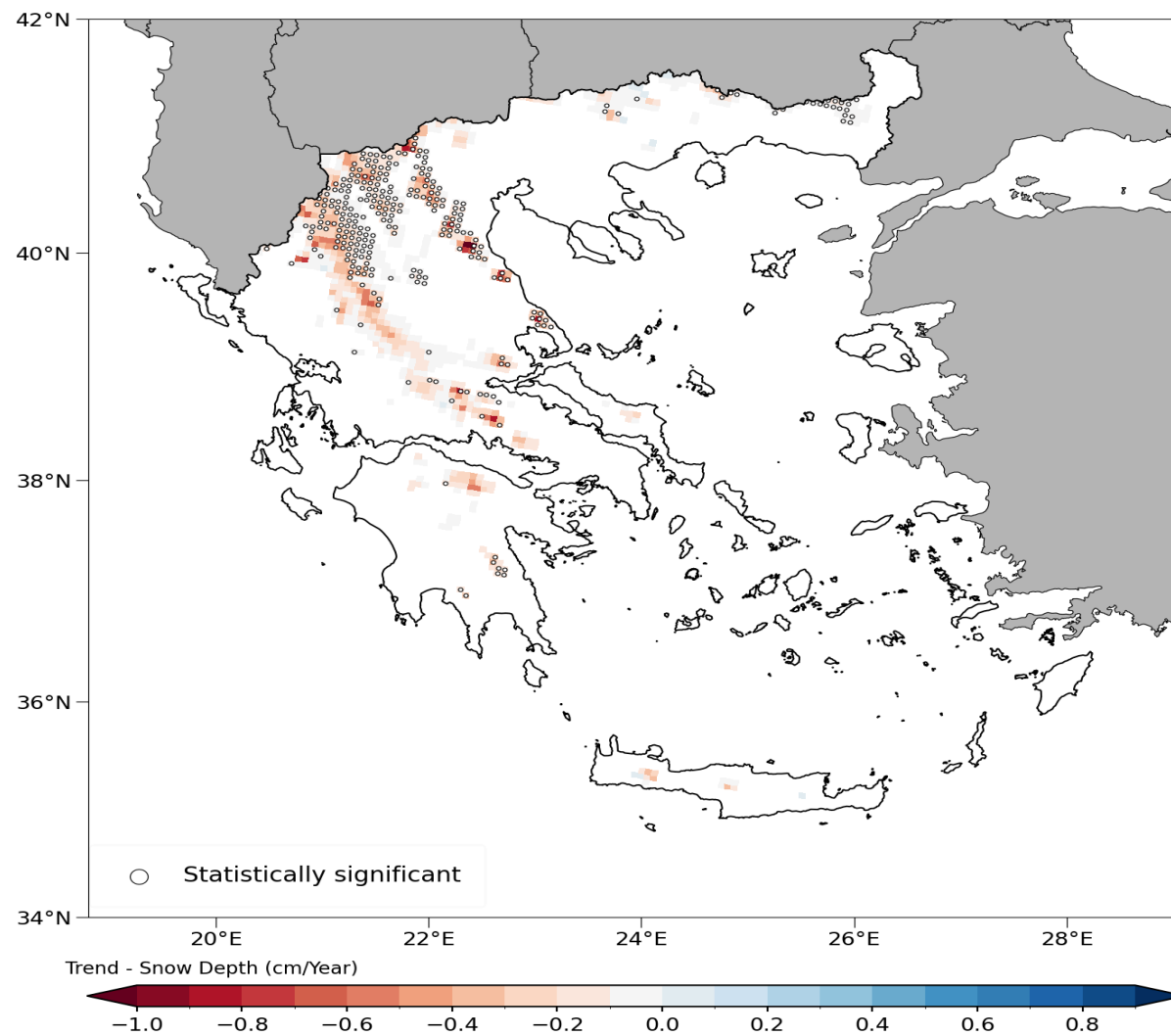
Σχήμα 9. Χάρτες αποχών από τις κλιματικές τιμές μέσου ημερήσιου ύψους χιονιού , σε αριθμητική και ποσοστιαία μορφή, κατα την δεκαετία 2011-2020, , κατα τους μήνες Φεβρουάριο (α,δ), Μάρτιο (β,ε) και Απρίλιο (γ,ζ).

Στη συνέχεια, έγινε ο υπολογισμός της διαχρονικής τάσης του μέσου ύψους χιονιού για διαφορετικές περιόδους του έτους, τόσο για το σύνολο της 30ετίας για την εύρεση της γενικότερης τάσης του μέσου ύψους χιονιού, όσο και για κάθε δεκαετία ξεχωριστά, έτσι ώστε να επιτευχθεί η περαιτέρω διερεύνηση της διαχρονικής τάσης της συγκεκριμένης μεταβλητής καθώς και για να διευκρινιστούν λεπτομερώς οι τάσεις κατά την διάρκεια κάθε δεκαετίας. Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται η διαχρονική τάση του μέσου ύψους χιονιού για την περίοδο Δεκεμβρίου-Μαρτίου για όλη την 30ετία ενώ στο Σχήμα 11 (α-γ) παρουσιάζεται η αντίστοιχη τάση για την εκάστοτε δεκαετία.

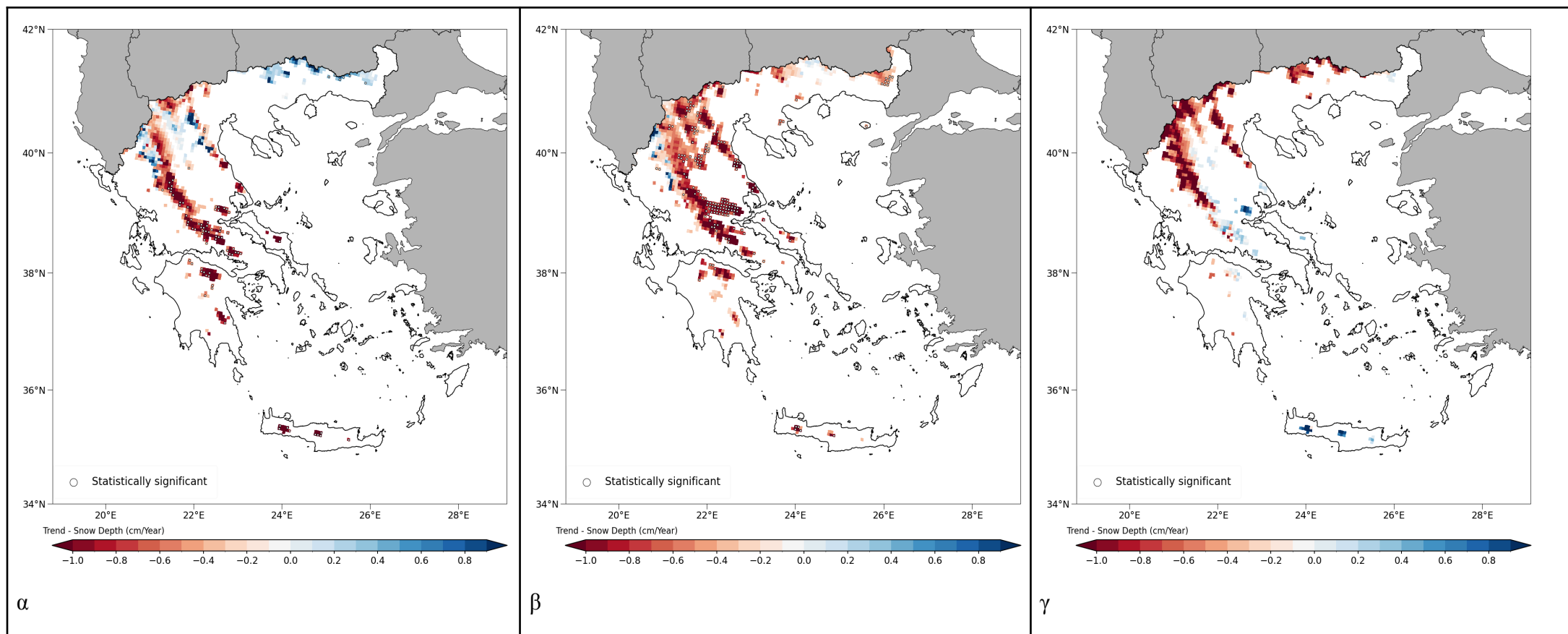
Στο Σχήμα 10, παρατηρείται σταδιακή μείωση του μέσου ύψους χιονιού για την περίοδο Δεκέμβριος - Μάρτιος σε όλες τις ορεινές-ημιορεινές περιοχές της χώρας με έμφαση στην κεντρική και βόρεια-βορειοδυτική Ελλάδα. Αυτή η μείωση εμφανίζεται στατιστικά σημαντική σε όλη την έκταση σχεδόν της Δυτικής Μακεδονίας καθώς και στα ορεινά της Πιερίας, Μαγνησίας και Στερεάς Ελλάδας. Ο ρυθμός αυτής της ελάττωσης σε ορισμένες περιοχές αγγίζει έως και το ένα εκατοστό ανά έτος με αποτέλεσμα σε αυτές τις περιοχές το μέσο ύψος χιονιού της περιόδου Δεκεμβρίου-Μαρτίου να έχει μειωθεί έως και 30 εκατοστά τα τελευταία 30 χρόνια.

Όσον αφορά τις επιμέρους δεκαετίες, την πρώτη δεκαετία (1991-2000) παρουσιάστηκε μια αρνητική τάση στο κεντρο-νότιο κομμάτι της οροσειράς της πίνδου με έμφαση την περιοχή της Θεσσαλίας όπου η μείωση φαίνεται και στατιστικά σημαντική. Παράλληλα, στα ορεινά της δυτικής Μακεδονίας υπήρχαν και περιοχές με θετικό πρόσημο στην τάση. Θετικές τιμές στην τάση του μέσου ύψους χιονιού τη συγκεκριμένη δεκαετία παρουσίασαν οι περιοχές της ανατολικής Μακεδονίας και της Θράκης αλλά δεν παρουσιάζονται στατιστικά σημαντικές. Κατά την δεκαετία 2001-2010 αρνητική τάση εμφανίζεται σε όλη την επικράτεια με εξαίρεση κάποιες περιοχές μεγάλου υψομέτρου στην περιοχή της Ηπείρου όπου οι μπλέ χρωματισμοί υποδεικνύουν μια τάση αύξησης του ύψους χιονιού για αυτή την δεκαετία. Στις υπόλοιπες περιοχές, η πτωτική τάση είναι εμφανής, ξεπερνώντας και το 1 εκατοστό ανά έτος. Στατιστικά σημαντική αρνητική τάση εμφανίζεται στις ορεινές περιοχές της κεντρικής Ελλάδας και κυρίως στα τμήματα της νότιας Θεσσαλίας και βόρειας Στερεάς Ελλάδας. Τέλος, την τελευταία δεκαετία παρατηρείται πάλι μια γενικευμένη πτωτική τάση στο μεγαλύτερο μέρος της χώρας χωρίς όμως να είναι κάπου στατιστικά σημαντική. Οι μόνες περιοχές που παρουσιάζουν θετική τάση την δεκαετία 2011-2020

είναι τα ορεινά τμήματα της νότιας Μαγνησίας, της Στερεάς Ελλάδας και τα μεγάλα υψόμετρα της Κρήτης.

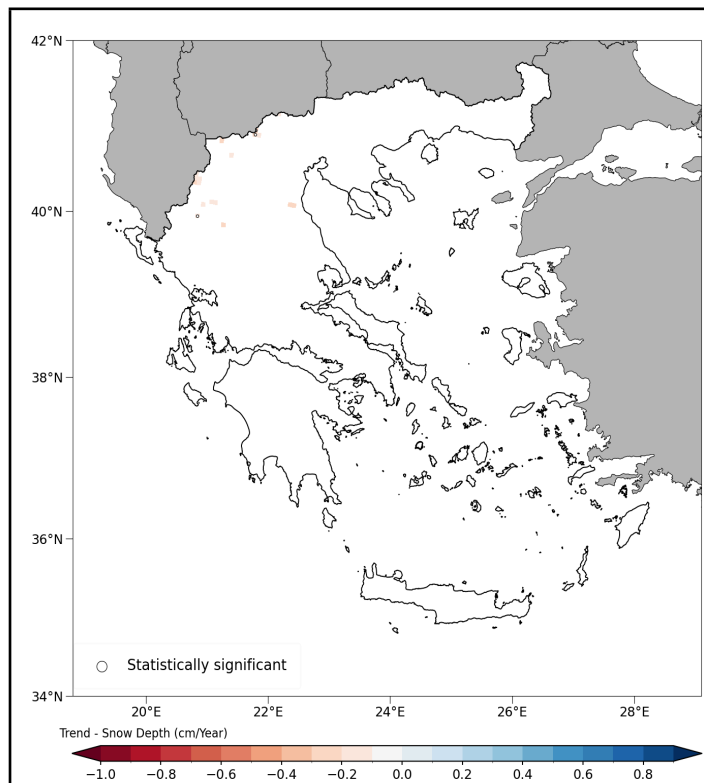


Σχήμα 10. Χάρτης διαχρονικής τάσης μέσου ημερήσιου ύψους χιονιού της περιόδου Δεκεμβρίου - Μαρτίου για την περίοδο 1991-2020.

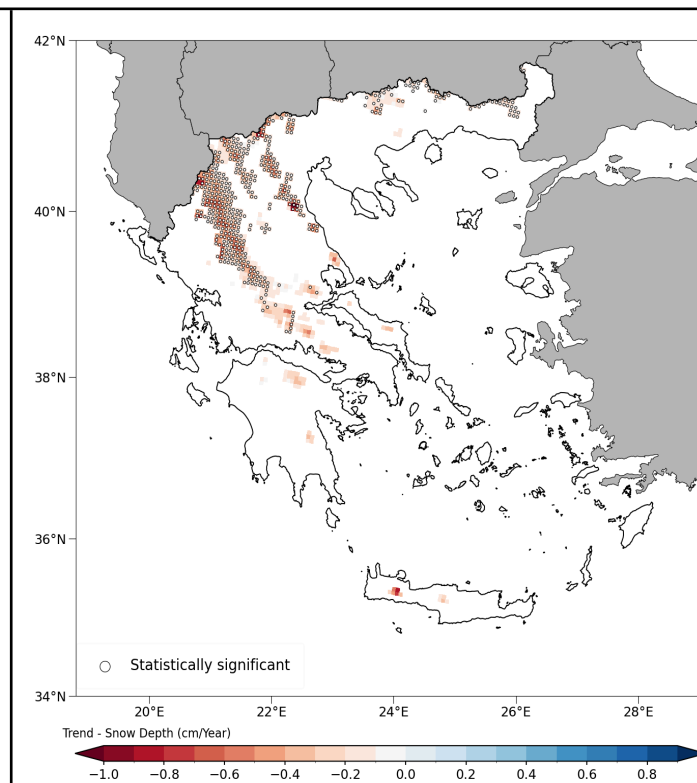


Σχήμα 11. Χάρτης διαχρονικής τάσης μέσου ημερήσιου ύψους χιονιού της περιόδου Δεκεμβρίου - Μαρτίου ανά δεκαετία: (α) 1991-2020, (β) 2001-2010, (γ) 2011-2020.

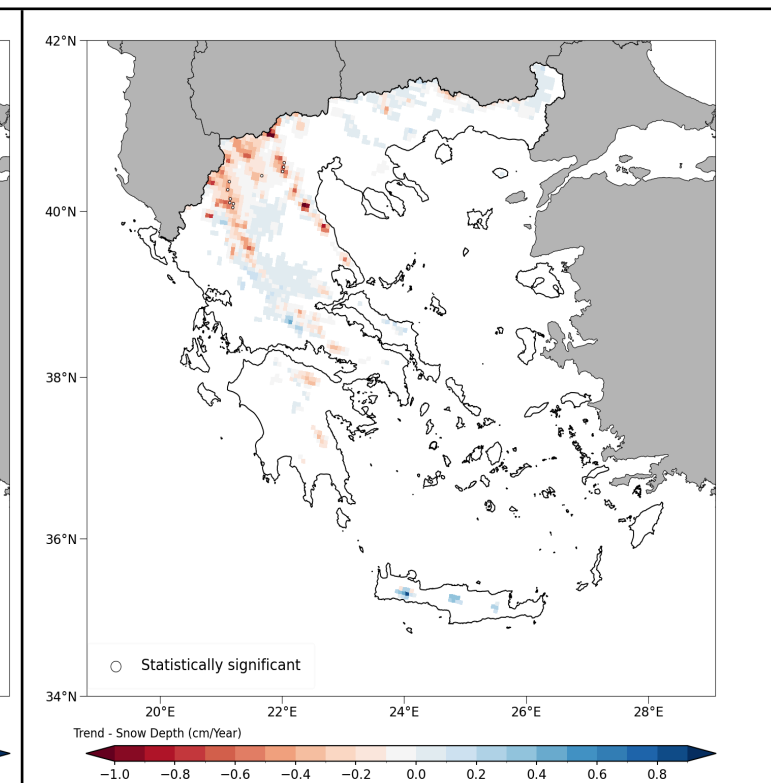
Η ανάλυση των διαχρονικών τάσεων του μέσου ύψους χιονιού, πραγματοποιήθηκε επίσης και για κάθε μήνα ξεχωριστά αποσκοπώντας στην καλύτερη μελέτη της διαχρονικής διακύμανσης του μέσου ύψους χιονιού και τον εντοπισμό κάποιας πιθανώς πιο ευάλωτης σε κλιματικές μεταβολές, περίοδο του έτους. Στο Σχήμα 12(α-ζ), απεικονίζονται οι διαχρονικές τάσεις για όλη την τριανταετία, του μέσου ύψους χιονιού για τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο και Απρίλιο. Από τα αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό πως στις ορεινές περιοχές της χώρας, παρατηρείται αρνητική τάση κατά την διάρκεια όλων των μηνών, η οποία είναι στατιστικά σημαντική τον μήνα Δεκέμβριο σε όλα τα ορεινά τμήματα της κεντρικής και βόρειας χώρας και αγγίζει το 1 εκατοστό ανά έτος. Στατιστικά σημαντική μείωση, εμφανίζεται σε σαφώς πιο περιορισμένες εκτάσεις, στην βόρεια χώρα κατά το μήνα Φεβρουάριο και στην κεντρική χώρα κατά τον μήνα Μάρτιο. Κατά τον μήνα Ιανουάριο, παρουσιάζονται μικρότερες τάσεις μείωσης, που εντοπίζονται κυρίως στην βορειοδυτική πλευρά της χώρας η οποίες όμως, δεν χαρακτηρίζονται στατιστικά σημαντικές, ενώ παράλληλα στην κεντρική Ελλάδα, ορισμένες περιοχές της Θράκης και στα ορεινά της Κρήτης παρατηρήθηκαν ελαφρώς θετικές τάσεις κατά τον μήνα αυτό.



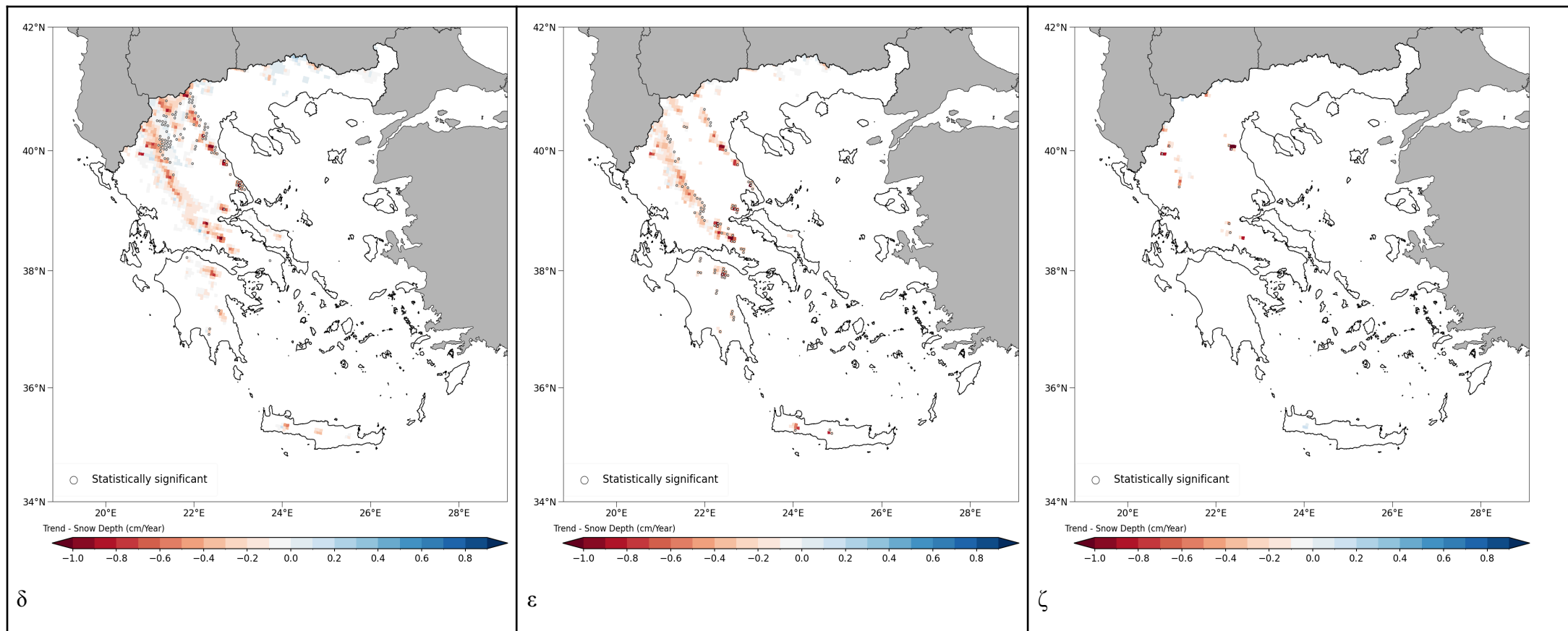
α



β



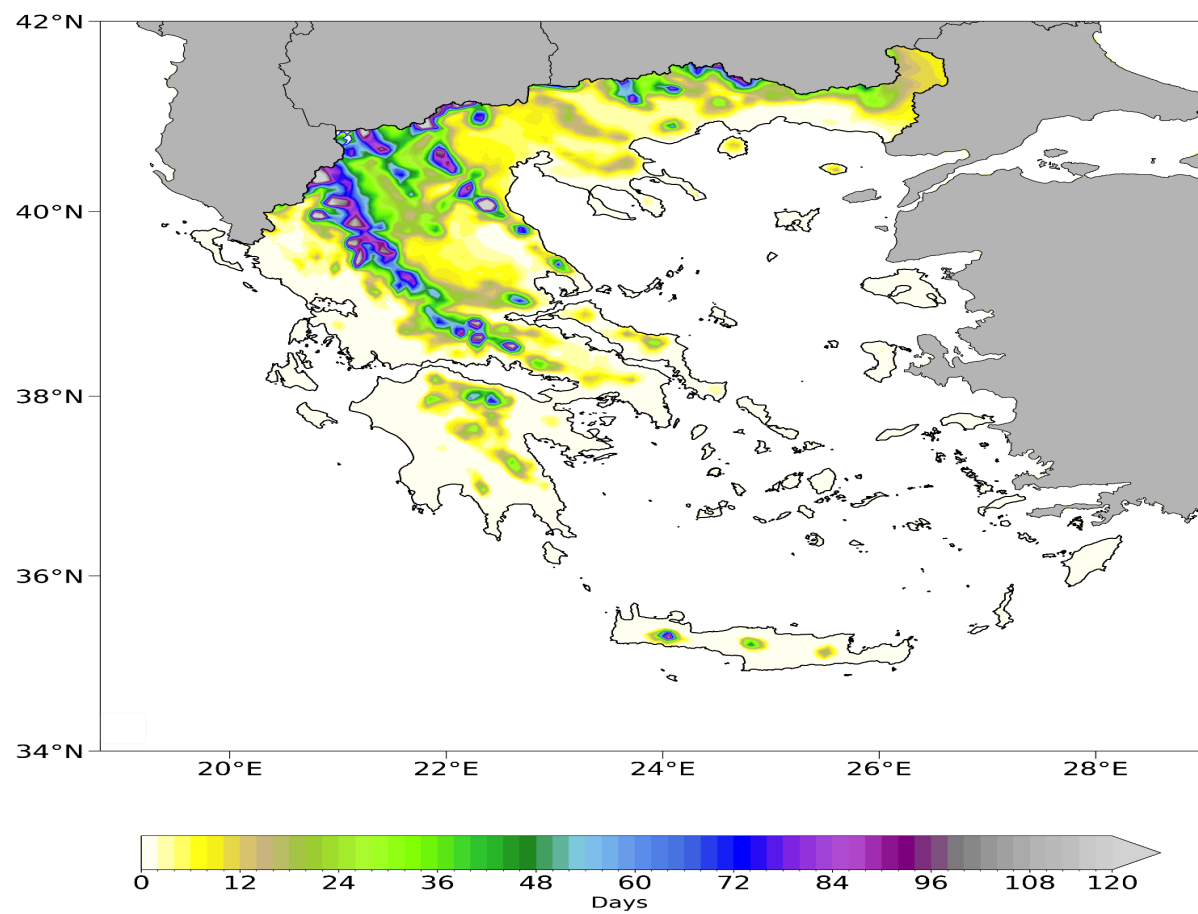
γ



Σχήμα 12. Χάρτες διαχρονικών τάσεων μέσου ημερήσιου ύψους χιονιού για την περίοδο 1991-2020, κατα τους μήνες Νοέμβριο (α), Δεκέμβριο (β) , Ιανουάριο (γ) , Φεβρουάριο (δ), Μάρτιο (ε) και Απρίλιο (ζ).

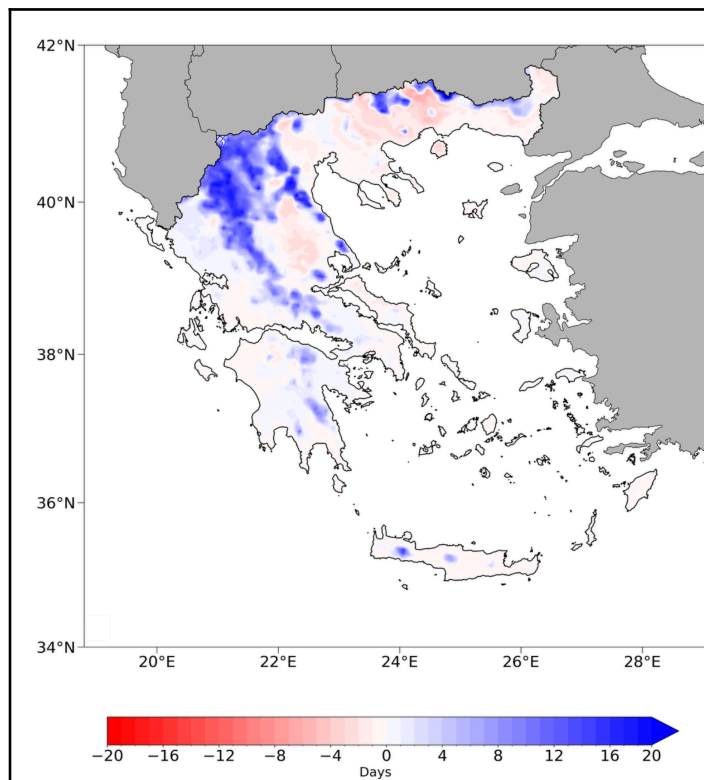
3.1.2 Έκταση και διάρκεια χιονοκάλυψης

Μελετήθηκε επίσης, η διάρκεια και η έκταση της χιονοκάλυψης τόσο ετησίως, όσο και μηνιαία. Στον παρακάτω χάρτη (Σχήμα 13) απεικονίζεται η μέση τιμή του αριθμού ημερών με χιονοκάλυψη για την περίοδο Σεπτέμβριος - Μάιος στην Ελληνική επικράτεια κατά την περίοδο 1991-2020. Όπως είναι αναμενόμενο, οι περιοχές με την μεγαλύτερη διάρκεια χιονοκάλυψης βρίσκονται στις ορεινές περιοχές της βόρειας και βορειοδυτικής Ελλάδας, με τα ορεινά τμήματα του Ολύμπου και της βόρειας Πίνδου να συγκεντρώνουν περισσότερες από 120 ημέρες με χιονοκάλυψη ανά έτος. Στα χαμηλά υψόμετρα της δυτικής μακεδονίας καταγράφονται κατά μέσο όρο 20-30 ημέρες με χιονοκάλυψη ενώ στα πεδινά τμήματα της κεντρικής και βόρειας Ελλάδας σημειώνονται ετησίως από 2 έως 10 ημέρες με χιονοσκεπές έδαφος, ανάλογα με την τοπογραφία της κάθε περιοχής. Στην νότια και νησιωτική Ελλάδα η διάρκεια χιονοκάλυψης κυμαίνεται από 0 ημέρες στα πιο νότια και πεδινά-παραθαλάσσια τμήματα έως 50 ημέρες στα ορεινότερα τμήματα, με εξαίρεση τα πολύ μεγάλα υψόμετρα της Πελοποννήσου και της Κρήτης όπου η διάρκεια χιονοκάλυψης ξεπερνάει τις 75 ημέρες ανά έτος.

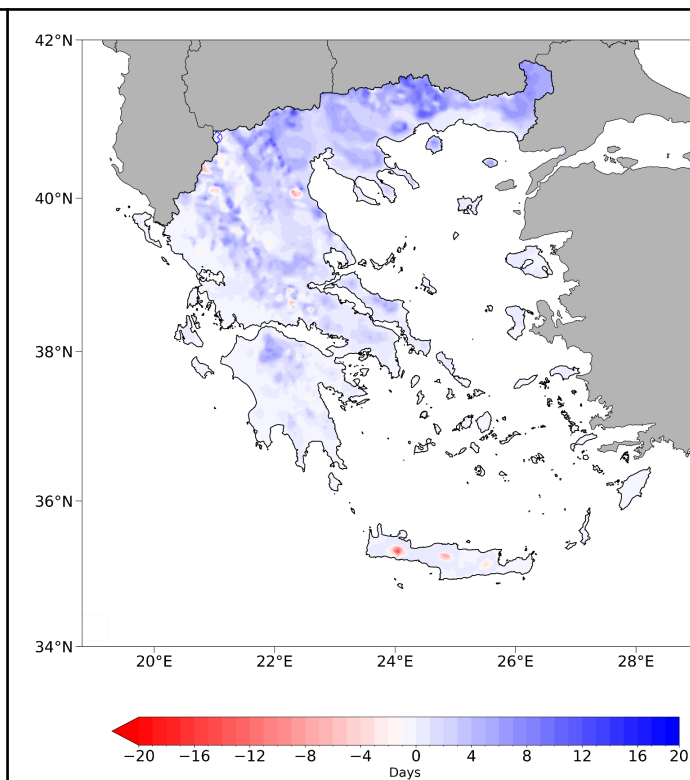


Σχήμα 13. Χάρτης μέσης διάρκειας χιονοκάλυψης (αριθμός ημερών) για την περίοδο Σεπτέμβριος - Μάιος κατά τα έτη 1991-2020.

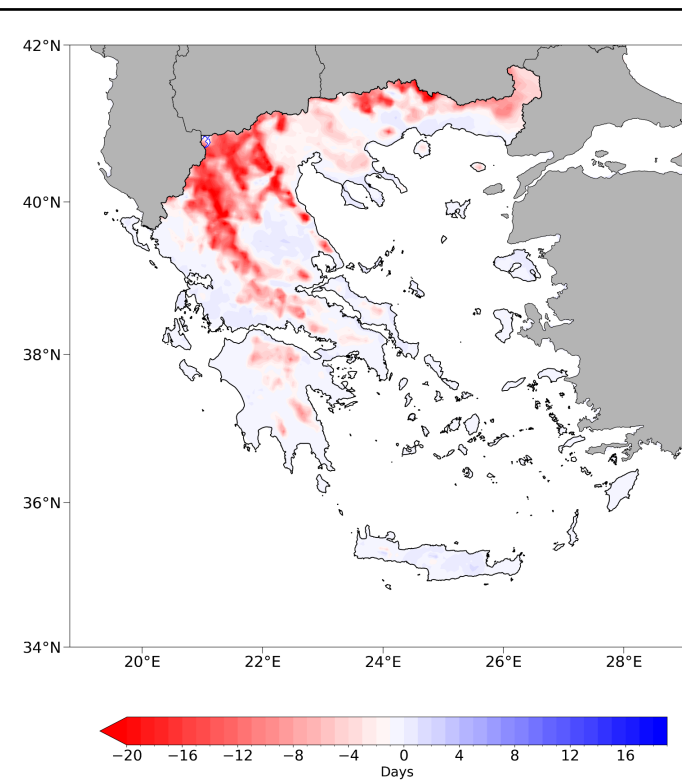
Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι αποχές από τις μέσες κλιματικές τιμές για κάθε δεκαετία ξεχωριστά, όπως εμφανίζονται στο Σχήμα 14, τόσο αριθμητικά (α-γ), όσο και σε ποσοστά επί τοις εκατό (δ-ζ). Χαρακτηριστικό είναι πως μόνο την 3η δεκαετία (2011-2020) εμφανίζονται εκτεταμένες αρνητικές αποχές που απαντώνται σε ολόκληρο τον ηπειρωτικό κορμό της χώρας με έμφαση στο βορειοδυτικό κομμάτι της. Πιο συγκεκριμένα, την δεκαετία 1991-2000 φαίνονται κατα κύριο λόγο θετικές αποχές σε σχέση με την κλιματική τιμή στις περισσότερες περιοχές της χώρας, και κυρίως σε περιοχές της Ηπείρου και της δυτικής Μακεδονίας, όπου η τιμές των αποκλίσεων αγγίζουν και το +80%. Αρνητικές αποχές εμφανίζονται σε κάποια πεδινά τμήματα της κεντρικής και βόρειας - βορειοανατολικής χώρας σε ποσοστά έως και -50% από την κλιματική τιμή. Ωστόσο, οι υψηλές ποσοστιαίες αποκλίσεις, στις πεδινές περιοχές, αντιστοιχούν σε μικρό απόλυτο αριθμό ημερών καθώς είναι λίγες και οι συνολικές ημέρες με χιονοκάλυψη στις πεδινές περιοχές όπως φάνηκε και στο Σχήμα 13. Η δεκαετία 2001-2010 χαρακτηρίζεται και αυτή από θετικές αποκλίσεις στο σύνολο της Ελλάδας με τις μεγαλύτερες τιμές να εντοπίζονται στις περιοχές της κεντρικής Μακεδονίας και της Θράκης. Εξάιρεση αποτελούν μεμονωμένες ημιορεινές περιοχές της δυτικής Ελλάδας και ορεινές περιοχές της Κρήτης όπου φαίνεται κατά την διάρκεια αυτής της δεκαετίας να είχαν μειωμένες ημέρες με χιονοκάλυψη σε σύγκριση με την κλιματική τιμή. Η τελευταία δεκαετία (2011-2020) εμφανίζει μια γενικευμένη αρνητική απόκλιση σε σύγκριση με την κλιματική τιμή σε όλη σχεδόν την έκταση της χώρας με την μεγαλύτερη μείωση να παρατηρείται στις ορεινές περιοχές της δυτικής και βορειοδυτικής χώρας. Ωστόσο, ορισμένες περιοχές χαμηλού υψομέτρου στην περιοχή της Θεσσαλίας και της Θράκης παρουσίασαν μια θετική αποχή της τάξεως του 15-20%, γεγονός που οφείλεται, όπως προαναφέρθηκε, σε 3 πολύ σημαντικά περιστατικά ψυχρών εισβολών που έλαβαν χώρα τα έτη 2012, 2017 και 2019 (Anagnostopoulou et al., 2017; Kömüscü et al., 2021; Tringa et al., 2022).



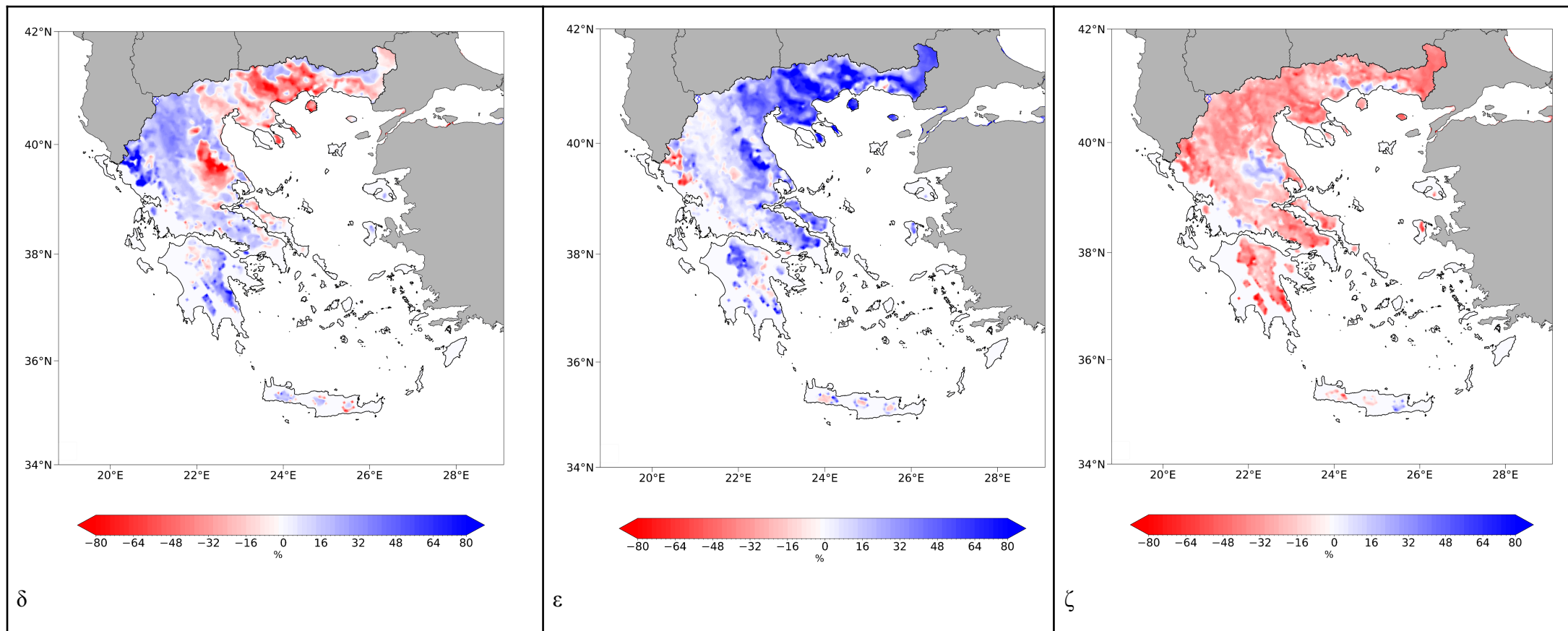
α



β

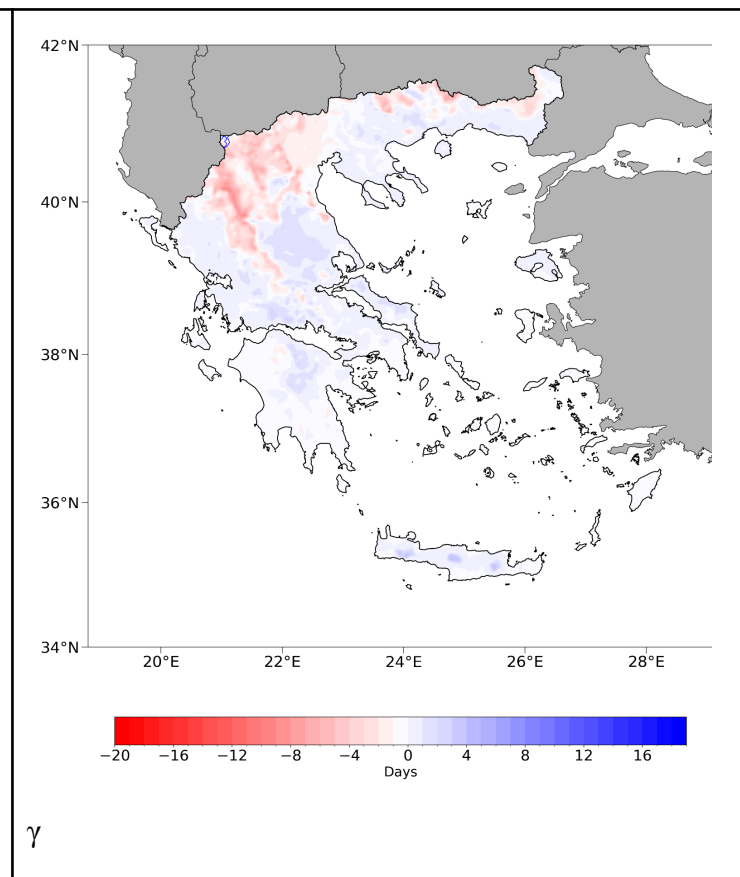
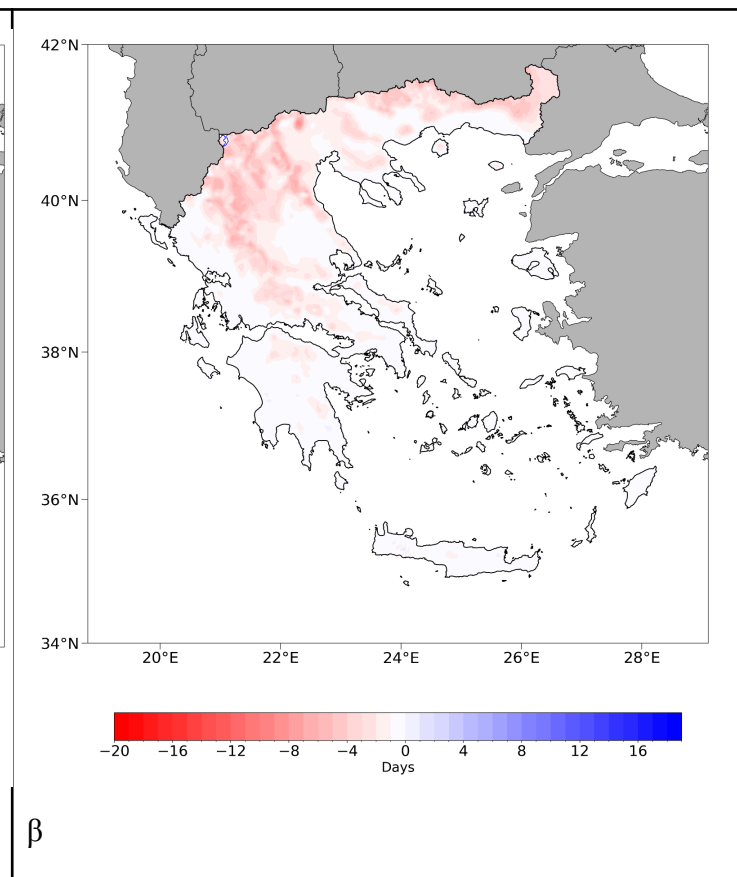
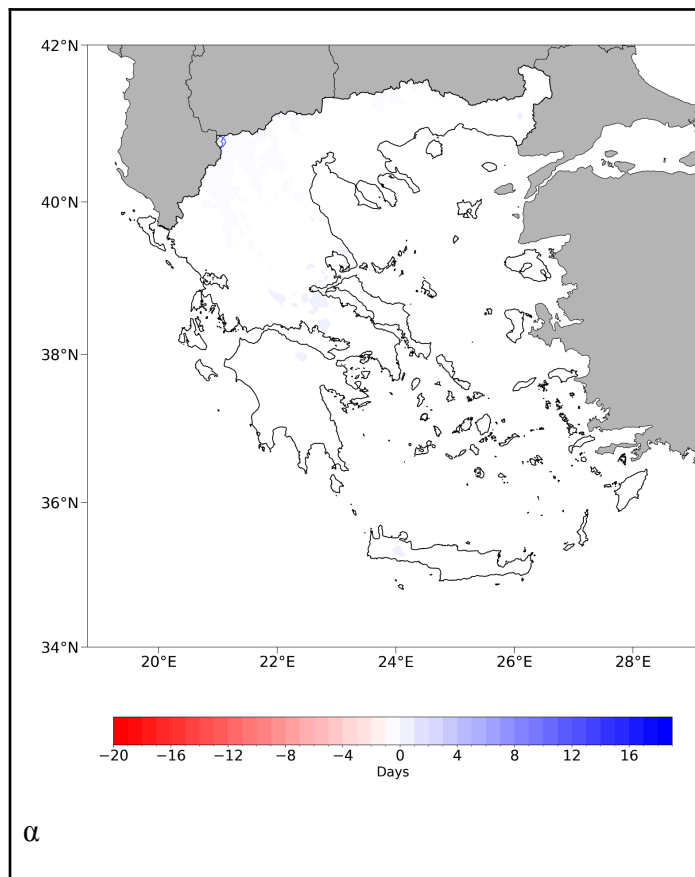


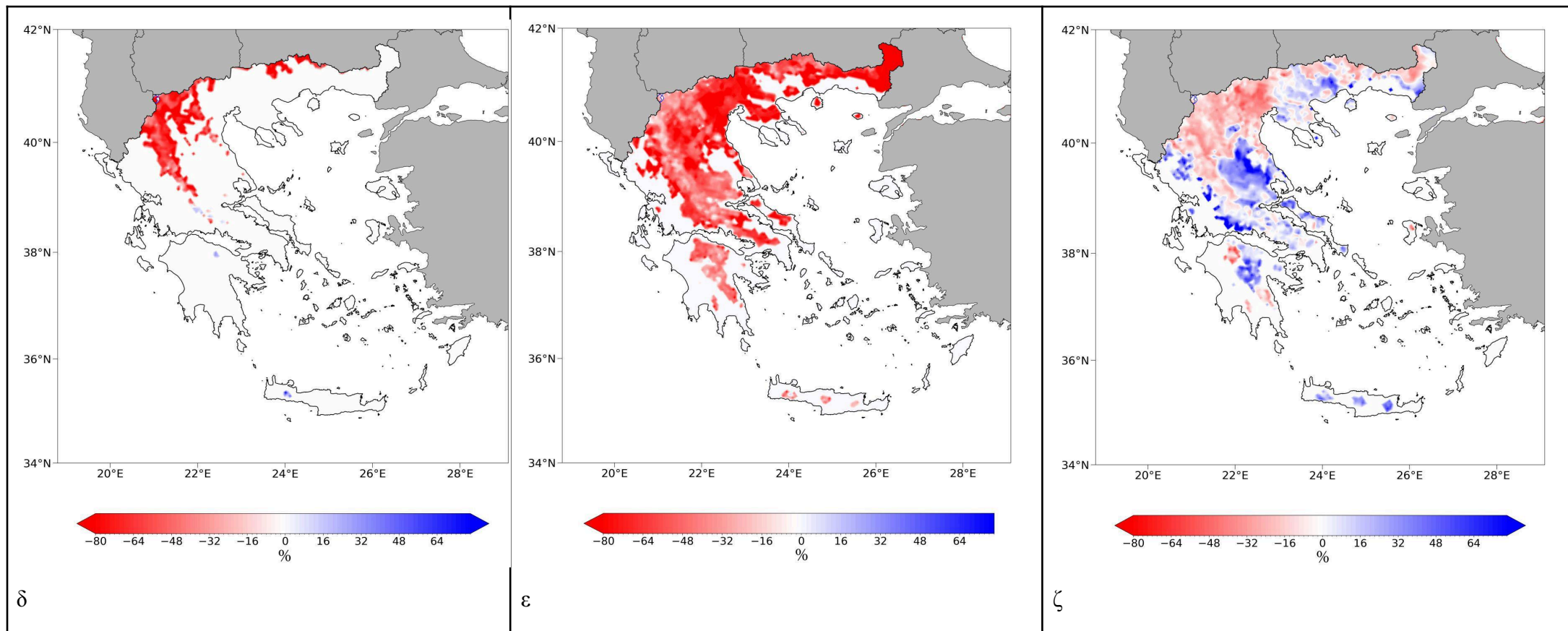
γ



Σχήμα 14. Χάρτες αποχών του μέσου ετήσιου αριθμού ημερών με χιονοκάλυψη ανα δεκαετία αριθμητικά (α) 1991-2000, (β) 2001-2010, (γ) 2011-2020 και ποσοστιαία (δ) 1991-2000, (ε) 2001-2010, (ζ) 2011-2020 για την περίοδο Σεπτέμβριος - Μάιος.

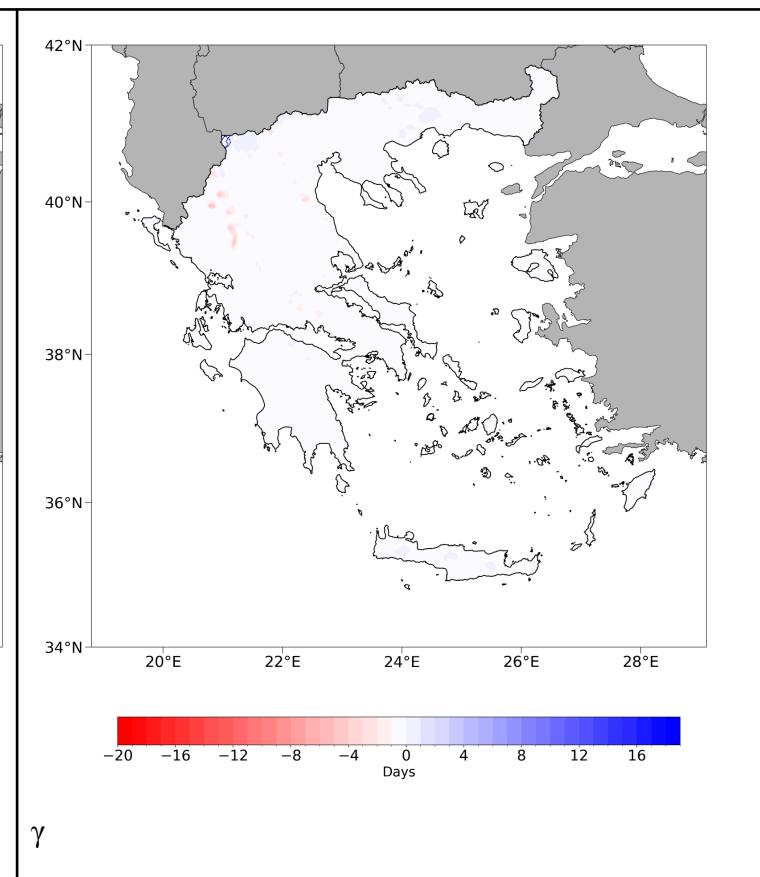
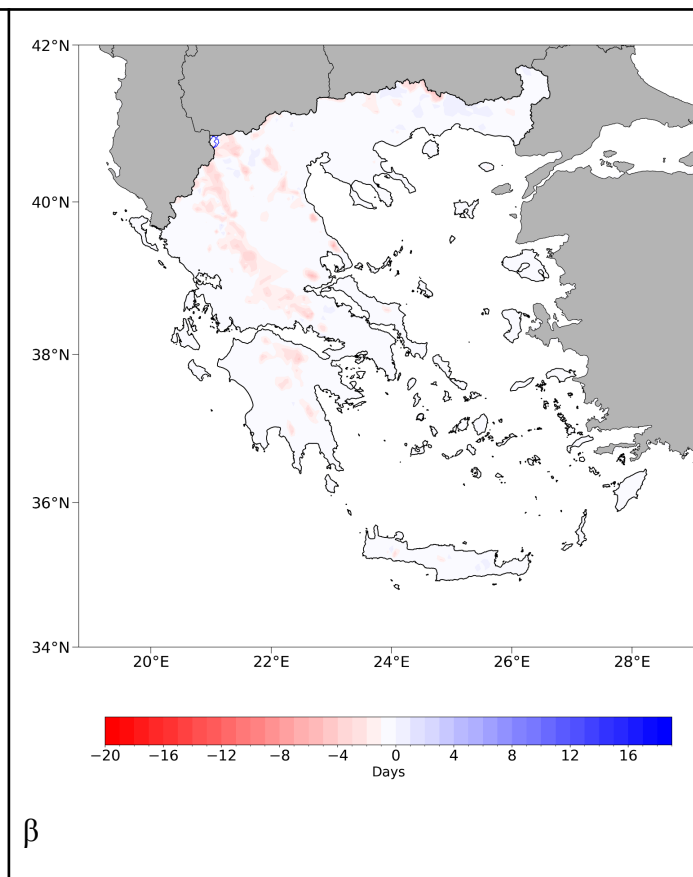
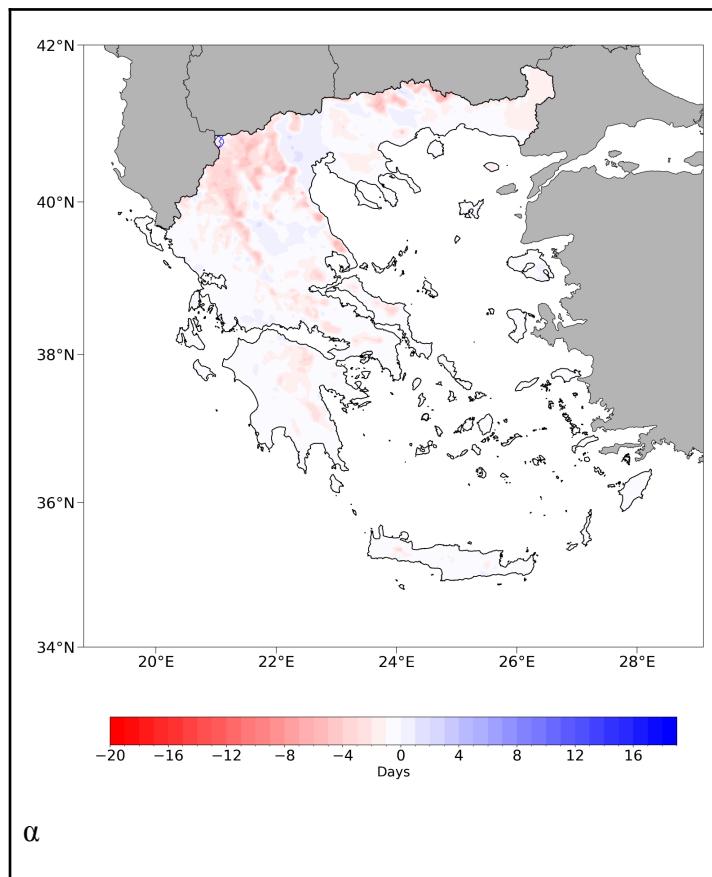
Η σημαντική αρνητική απόκλιση της δεκαετίας 2011-2020, αναλύθηκε περαιτέρω ανά μήνα, για την ανάδειξη συγκεκριμένων περιόδων του έτους που εμφανίζουν εντονότερη μεταβολή στις συνθήκες χιονοκάλυψης. Οι μήνες που παρουσιάζονται αφορούν την περίοδο Νοέμβριο-Απρίλιο, καθώς οι μήνες Σεπτέμβριος, Οκτώβριος και Μάιος εμφανίζουν ελάχιστες ημέρες με χιονοκάλυψη και επομένως οι μεταβολές είναι δυσδιάκριτες. Από τα αποτελέσματα, προκύπτει πως σημαντική μείωση της διάρκειας χιονοκάλυψης παρατηρείται όλους τους μήνες της περιόδου Νοέμβριος - Απρίλιος κατά την τελευταία δεκαετία, κυρίως στις ορεινές και ημιορεινές περιοχές της χώρας, φτάνοντας ποσοστά ακόμα και μεγαλύτερα του $<-80\%$. Πιο συγκεκριμένα, το μοτίβο που φαίνεται να υπερισχύει είναι μια γενικευμένη μείωση της διάρκειας χιονοκάλυψης κατά την διάρκεια όλων των μηνών που παρουσιάζεται στα Σχήματα 15(α-ζ) και 16(α-ζ), η οποία φαίνεται να είναι πιο εμφανής κατά την έναρξη της χειμερινής περιόδου, το δίμηνο Νοέμβριος-Δεκέμβριος, ενώ στην συνέχεια υπάρχουν ορισμένες περιοχές που εμφάνισαν μια μικρή αύξηση σε σχέση με την κλιματική τους τιμή. Πιο αναλυτικά, τον μήνα Νοέμβριο (Σχήμα 15α,δ), όπου το χιόνι εντοπίζεται σχεδόν αποκλειστικά σε μεγάλα υψόμετρα της κεντρικής και βόρειας χώρας, παρατηρήθηκε μια αρνητική αποχή $<-50\%$ στο σύνολο αυτών των περιοχών. Ο Δεκέμβριος (Σχήμα 15β,ε) είναι ο μήνας με τη μεγαλύτερη συρρίκνωση της διάρκειας χιονοκάλυψης σε όλη την έκταση της χώρας. Στην βόρεια και κεντρική Ελλάδα, η αρνητική αποχή από την κλιματική τιμή κυμαίνεται σε ποσοστά από -30% έως και -80% , τα οποία μεταφράζονται ως απώλεια έως και 15 ημέρες χιονοκάλυψης. Ο Ιανουάριος (εικόνα 15γ,ζ), χαρακτηρίζεται επίσης από γενικευμένη ελάττωση της χιονοκάλυψης στην βόρεια και βορειοδυτική χώρα εμφανίζοντας σημαντικές αρνητικές αποχές έως και -40% . Ωστόσο, στα πεδινά τμήματα της Θεσσαλίας, της Στερεάς Ελλάδας, ορισμένες περιοχές του βορειοανατολικού τμήματος της Πελοποννήσου καθώς και στα ορεινά τμήματα της Κρήτης, παρατηρήθηκε αυξημένη χιονοκάλυψη έως και $+50\%$ σε σχέση με την κλιματική τιμή. Αυτές οι αυξημένες τιμές, οφείλονται πάλι, στα 2 ισχυρά κύματα ψύχους που προαναφέρθηκαν και οδήγησαν στην εκδήλωση ισχυρών πολυήμερων χιονοπτώσεων σε πολλές περιοχές της χώρας τα έτη 2017 και 2019.

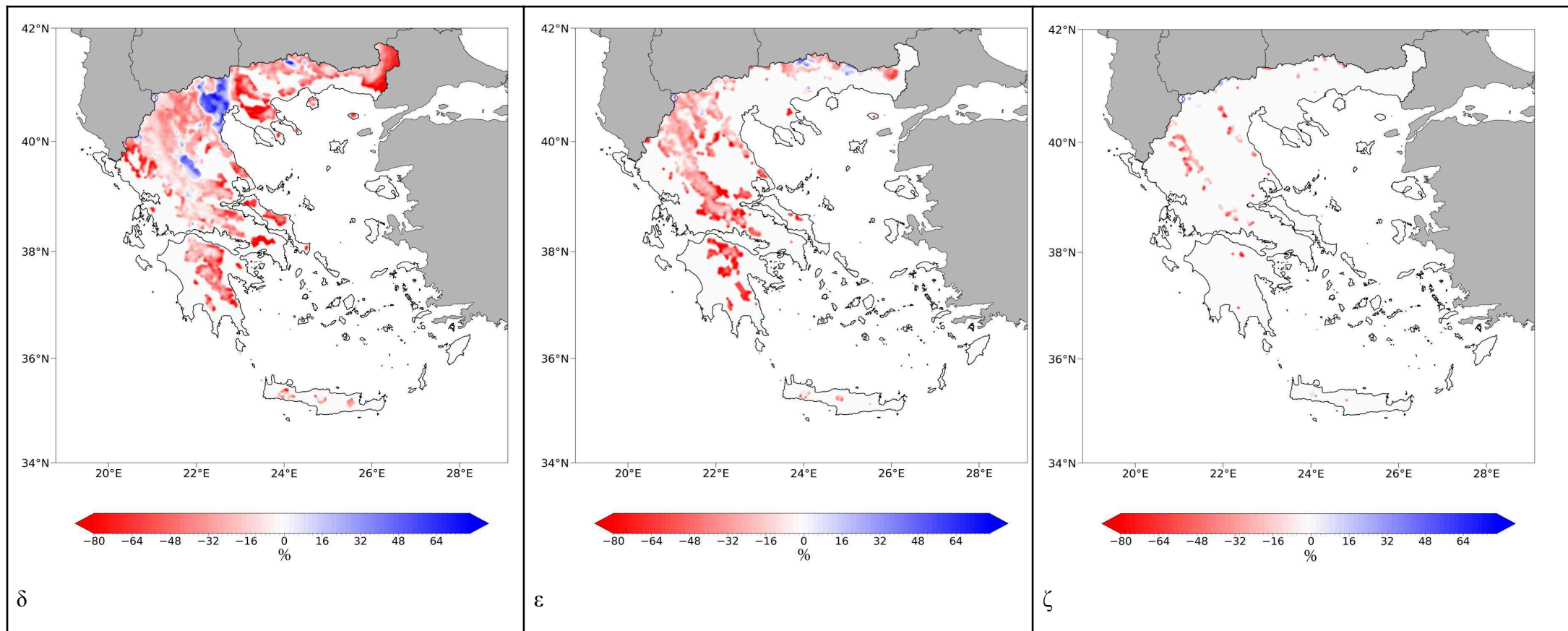




Εικόνα 15. Χάρτες αποχών μέσου ετήσιου αριθμού ημερών με χιονοκάλυψη από τις κλιματικές τιμές, σε αριθμητική και ποσοστιαία μορφή, κατά την δεκαετία 2011-2020, κατά τους μήνες Νοέμβριο (α,δ), Δεκέμβριο (β,ε) και Ιανουάριο (γ,ζ).

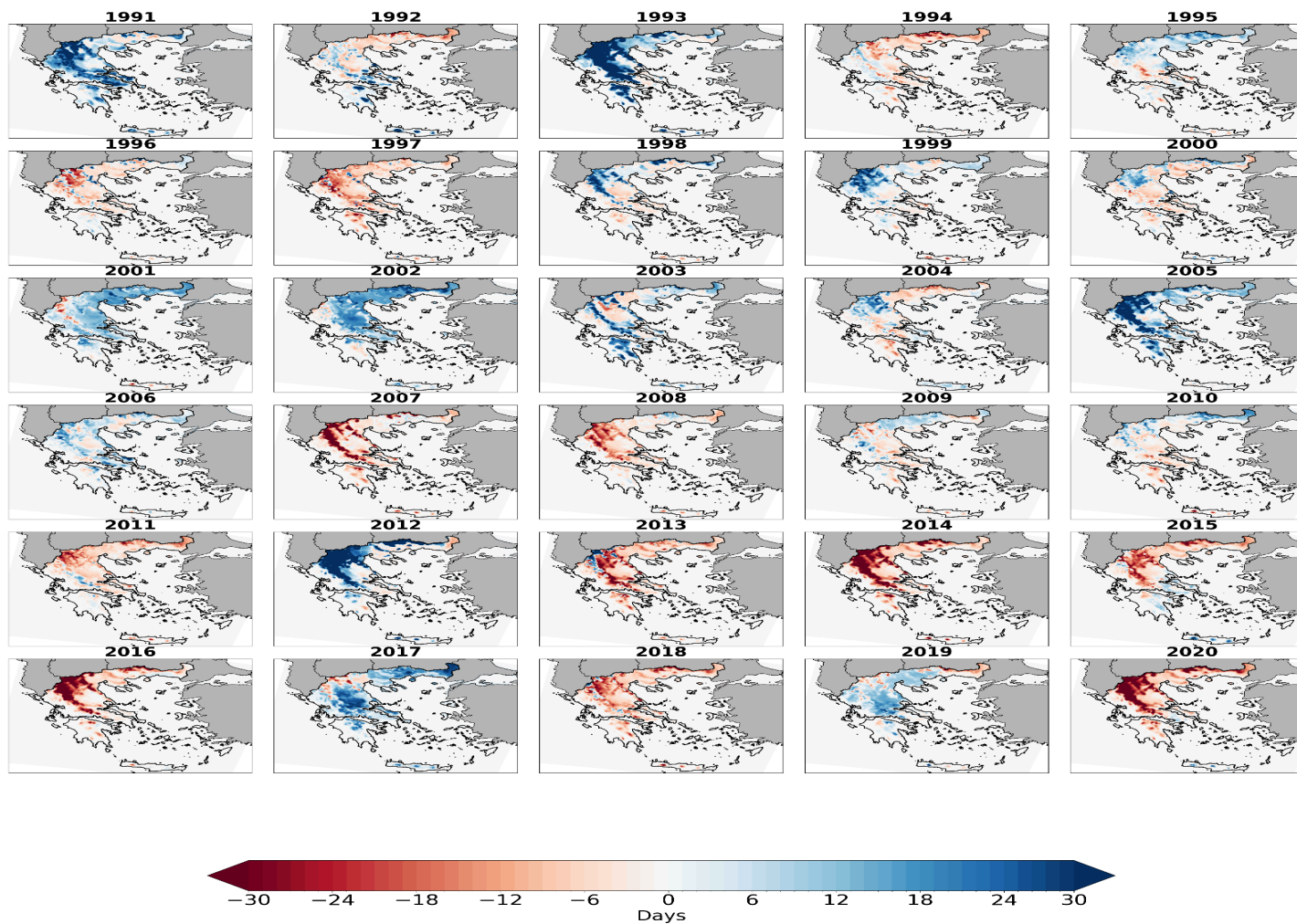
Κατά τον μήνα Φεβρουάριο (Σχήμα 16α,δ), η διάρκεια χιονοκάλυψης ήταν εμφανώς μειωμένη σε όλη την την έκταση της χώρας αγγίζοντας ποσοστά έως και $<-60\%$ με εξαίρεση τις περιοχές της δυτικής Θεσσαλίας και της κεντρικής Μακεδονίας όπου υπήρχαν σημαντικές θετικές αποκλίσεις έως και 40% που οφείλονται σε διαρκείς χιονοπτώσεις κατά τον Φεβρουάριο του 2012. Τέλος, οι μήνες Μάρτιος και Απρίλιος (Σχήματα 16β,ε και 16γ,ζ), χαρακτηρίζονται και αυτοί από μειωμένη χιονοκάλυψη η οποία απαντάται εξίσου σε ορεινές περιοχές της βόρειας, κεντρικής και νότιας χώρας. Σημαντικότερη φαίνεται να είναι η αρνητική αποχή στα ορεινά της Στερεάς ελλάδας και της Πελοποννήσου κατά τον Μάρτιο και στα ορεινά της Ηπείρου και της Μακεδονίας κατά τον μήνα Απρίλιο.





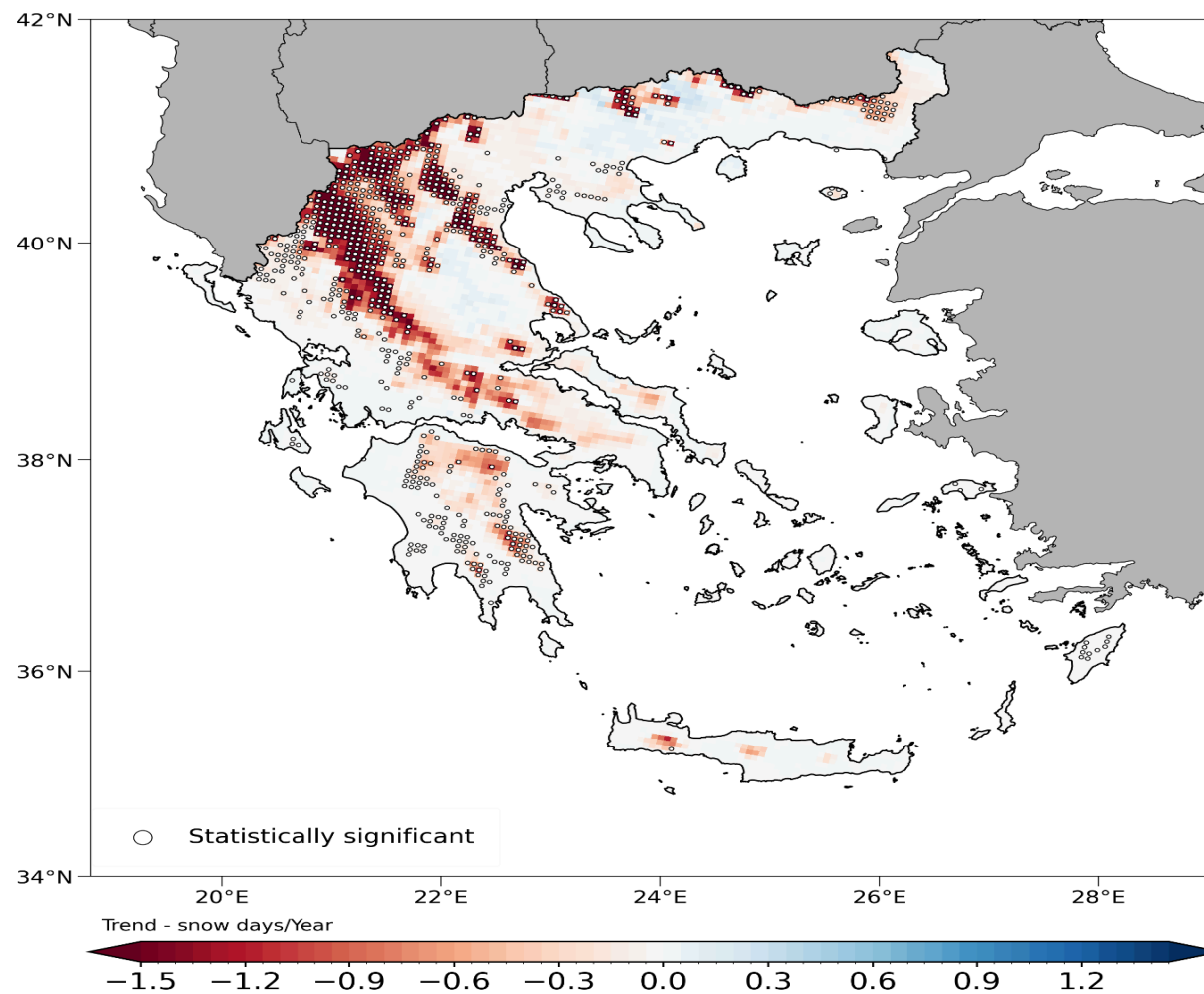
Σχήμα 16. Χάρτες αποχών μέσου ετήσιου αριθμού ημερών με χιονοκάλυψη από την κλιματική τιμή σε αριθμητική και ποσοστιαία μορφή, κατα την δεκαετία 2011-2020, κατα τους μήνες Φεβρουάριο (α,δ), Μάρτιο (β,ε) και Απρίλιο (γ,ζ).

Όπως και στην μεταβλητή του βάθους χιονιού, έτσι και στην χιονοκάλυψη, υπολογίστηκαν οι αποχές του κάθε έτους από την κλιματική τιμή, όπως απεικονίζονται στην εικόνα 17. Ενδιαφέρον εύρημα είναι πως εμφανίζεται πληθώρα ετών με ημέρες χιονοκάλυψης σημαντικά λιγότερες από την κλιματική τιμή μέσα στην τελευταία δεκαπενταετία, με 9 στα 15 χρόνια (2007, 2008, 2011, 2013, 2014, 2015, 2016, 2018 και 2020) να εμφανίζουν πολύ μειωμένη χιονοκάλυψη τόσο χωρικά, όσο και σχετικά με την διάρκεια, με τις μεγαλύτερες αποκλίσεις να εντοπίζονται στα έτη 2014, 2016 και 2020, εμφανίζοντας μια απώλεια έως και περισσότερες από 30 ημέρες χιονοκάλυψης στην βορειοδυτική Ελλάδα. Μόνο τα έτη 2006, 2012, 2017 και 2019 φαίνεται να παρουσιάζουν σχετικά αυξημένη χιονοκάλυψη στον ελλαδικό χώρο τα τελευταία 15 χρόνια. Τα ευρήματα επιβεβαιώνουν τον προηγούμενο ισχυρισμό, πως η ελάττωση των χιονοπτώσεων είναι πιο εύκολα διακριτή στην περιοχή της βόρειας Ελλάδας και κυρίως στην δυτική Μακεδονία. Τέλος είναι σημαντικό να αναφερθεί πως στα πρώτα 15 έτη της χρονοσειράς (1991-2005) εμφανίζονται τα περισσότερα έτη με θετικές αποχές, με τα έτη 1991, 1993, 2001, 2002, 2003 και 2005 να έχουν σημαντικές αποκλίσεις από την κλιματική τιμή.



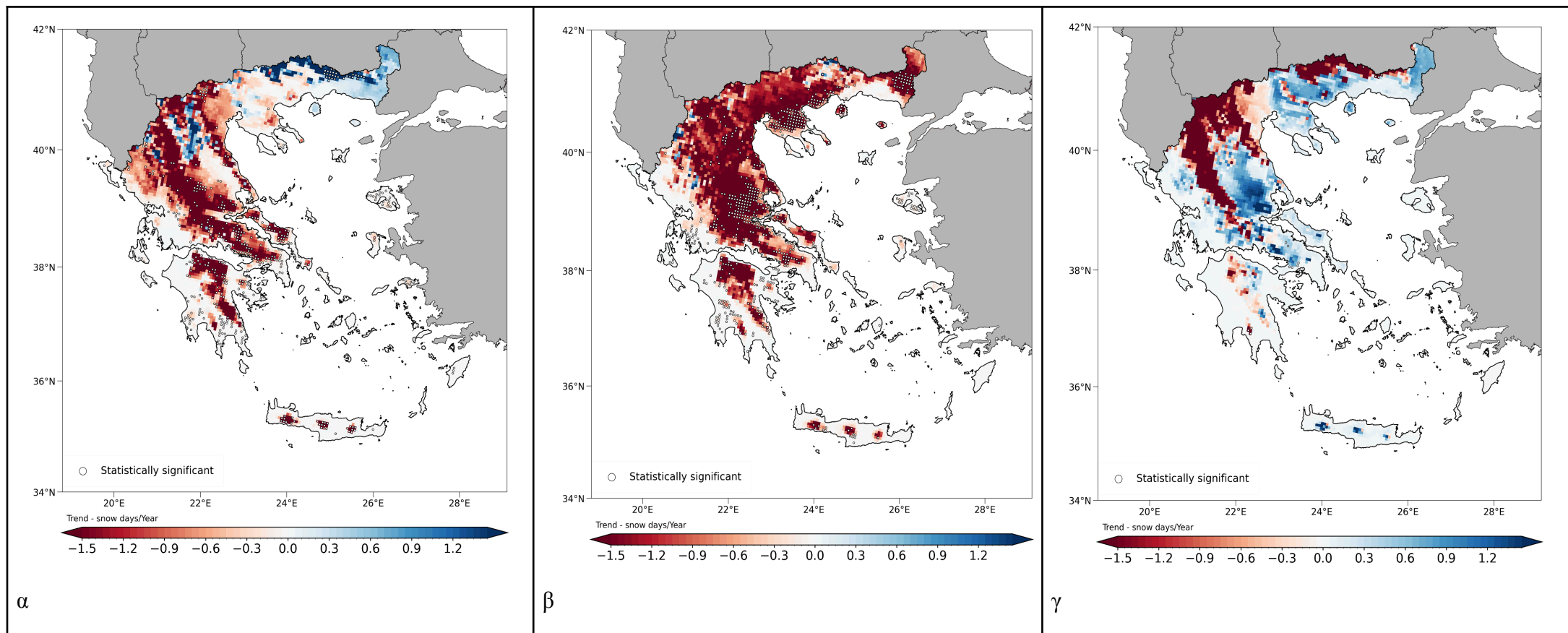
Σχήμα 17. Χάρτες αποχών μέσου ετήσιου αριθμού ημερών με χιονοκάλυψη της περιόδου Σεπτέμβριος - Μάιος ανά έτος, κατά την 30ετία 1991-2020.

Έπειτα υπολογίστηκαν οι διαχρονικές τάσεις της χιονοκάλυψης αξιοποιώντας το κριτήριο Mann - Kendall για τον προσδιορισμό της σημαντικότητας αυτών. Στο Σχήμα 18 απεικονίζεται η τάση της συνολικής διάρκειας χιονοκάλυψης της περιόδου Σεπτεμβρίου - Μαΐου καθόλη την διάρκεια της περιόδου 1991-2020. Στατιστικά σημαντική μείωση παρατηρείται σε όλη την Βορειοδυτική χώρα με ρυθμό μείωσης μεγαλύτερο από 1 ημέρα ανά έτος. Αντίστοιχα αρνητική τάση, στατιστικά σημαντική, εμφανίζεται και σε περιοχές της κεντρικής Μακεδονίας και της Θράκης, καθώς και στις περισσότερες ορεινές περιοχές της Θεσσαλίας και της Πελοποννήσου. Πτωτική τάση επίσης, παρατηρείται και στα ορεινά της Εύβοιας, της Στερεάς Ελλάδας και της Κρήτης, αλλά δεν φαίνεται στατιστικά σημαντική. Θετική τάση εμφανίζεται μόνο σε ορισμένα πεδινά τμήματα της Ανατολικής Μακεδονίας, της Θράκης και της Θεσσαλικής πεδιάδας η οποία όμως, δεν είναι στατιστικά σημαντική.



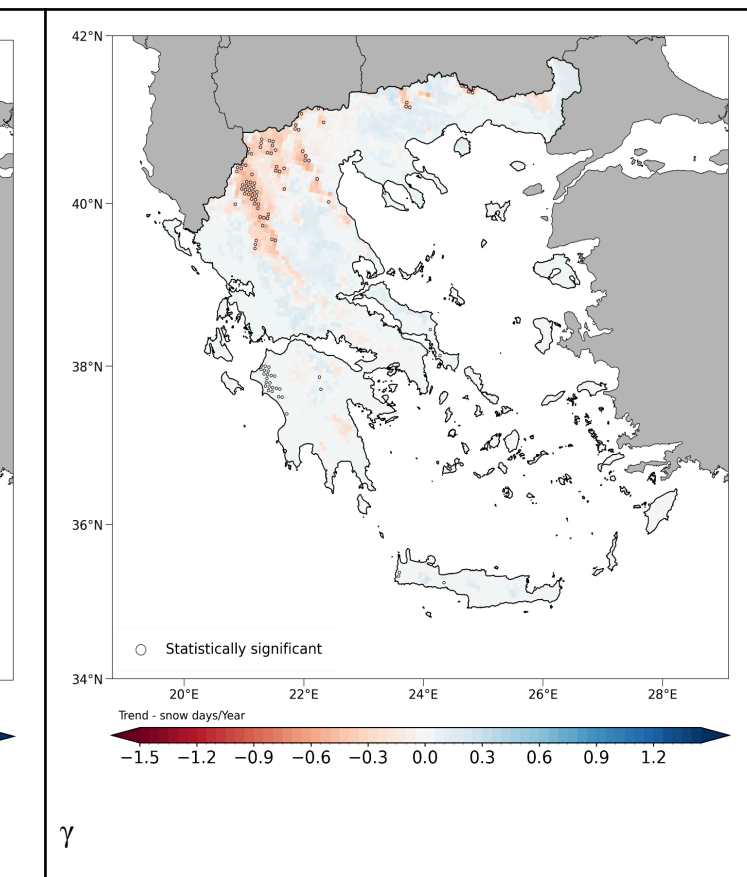
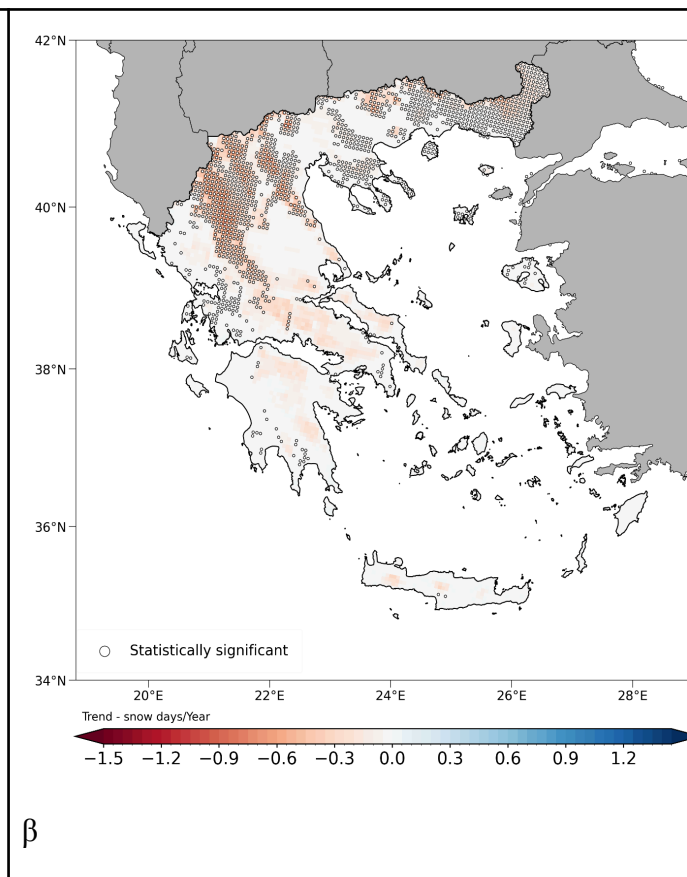
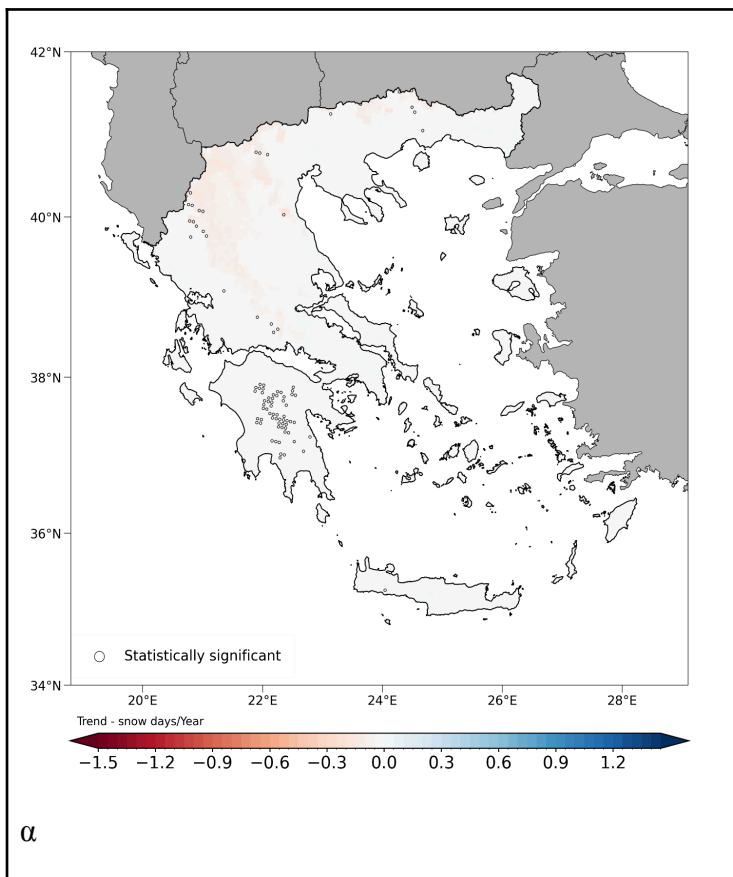
Εικόνα 18. Χάρτης διαχρονικής τάσης μέσου ετήσιου αριθμού ημερών με χιονοκάλυψη της περιόδου Σεπτεμβρίου- Μαΐου, για την 30ετία 1991-2020.

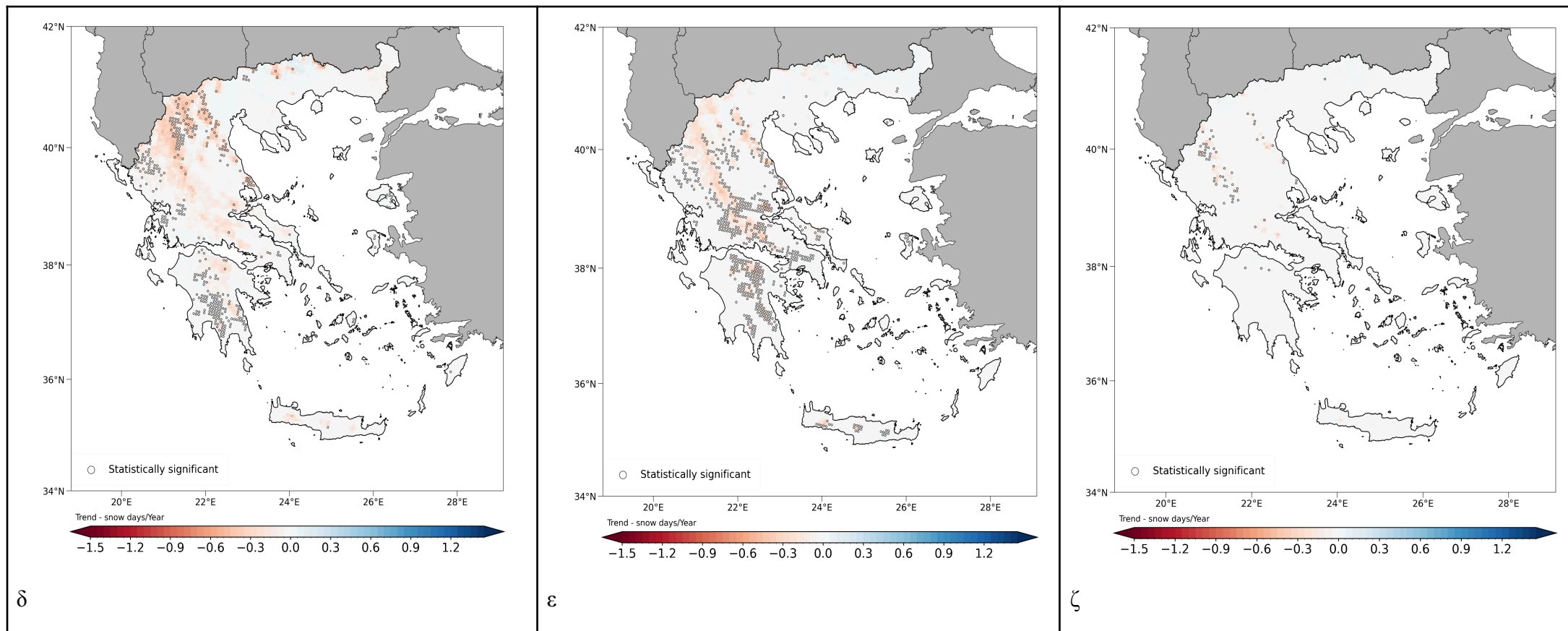
Μελετώντας την διαχρονική τάση της χιονοκάλυψης στις επιμέρους δεκαετίες (Σχήμα 19α-γ), διαπιστώθηκε ότι κατά την πρώτη δεκαετία υπήρξε μια αρνητική τάση στην διάρκεια χιονοκάλυψης στο μεγαλύτερο μέρος της Ελλάδας με εξαίρεση την περιοχή της Θράκης και τα χαμηλά υψόμετρα της δυτικής Μακεδονίας όπου παρατηρήθηκε μια θετική τάση, η οποία μάλιστα στην οροσειρά της Ροδόπης ήταν και στατιστικά σημαντική. Στην υπόλοιπη κεντρική και νότια χώρα υπήρξε εμφανής τάση ελάττωσης της χιονοκάλυψης, πράγμα που οφείλεται στην ύπαρξη αρκετών ψυχρών χειμώνων στην έναρξη της δεκαετίας, όπως οι χειμώνες 1991-1992 και 1992-1993 που εμφάνισαν παρατεταμένη διάρκεια χιονοκάλυψης (Σχήμα 17). Κατά την δεύτερη δεκαετία, τα κοκκινωπά χρώματα στον χάρτη υποδεικνύουν μια εκτεταμένη τάση μείωσης σε όλη την χώρα σχεδόν, η οποία χαρακτηρίζεται στατιστικά σημαντική κυρίως στην κεντρική Μακεδονία καθώς και σε περιοχές των νομών Καρδίτσας και Μαγνησίας. Τέλος, την δεκαετία 2011-2020, παρατηρήθηκαν εξίσου τάσεις θετικού και αρνητικού προσήμου. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται να υπήρξε μια έντονη τάση μείωσης στο βορειοδυτικό τμήμα της Ελλάδας και κυρίως στα ορεινά και ημιορεινά τμήματα, ενώ στα πεδινά της ανατολικής ηπειρωτικής χώρας και κυρίως σε περιοχές της Θεσσαλίας, της ανατολικής Μακεδονίας και της Θράκης υπήρξε μια τάση αύξησης της διάρκειας της χιονοκάλυψης, η οποία ανήλθε σε τιμές έως και +1 ημέρα ανά έτος. Ωστόσο, δε φαίνεται να υπήρξε κάπου στατιστικά σημαντική μεταβολή κατά την διάρκεια της δεκαετίας 2011-2020.



Σχήμα 19. Χάρτες διαχρονικής τάσης μέσου ετήσιου αριθμού ημερών με χιονοκάλυψη της περιόδου Σεπτεμβρίου- Μαΐου ανά δεκαετία :
(α)1991-2020, (β)2001-2010 και (γ)2011-2020.

Στη συνέχεια, παρατίθενται οι χάρτες που απεικονίζουν την διαχρονική τάση της διάρκειας χιονοκάλυψης για όλη την περίοδο των 30 ετών 1991-2020 για κάθε μήνα ξεχωριστά (Σχήμα 20). Στατιστικά σημαντική αρνητική τάση τον μήνα Νοέμβριο (Σχήμα 20α), εντοπίζεται σε ορεινές περιοχές της βορειοδυτικής Ελλάδας και κυρίως στα ορεινά της Πελοποννήσου, με απώλεια έως και 0.5 ημέρες ανα ετος. Κατά τον μήνα Δεκέμβριο (Σχήμα 20β), στατιστικά σημαντική μείωση εμφανίζεται σε όλη σχεδόν την βόρεια Ελλάδα με ρυθμό ελάττωσης που αγγίζει έως και την 1 ημέρα ανα έτος, με αποτέλεσμα να υπάρχουν περιοχές που υφίστανται σχεδόν ολοκληρωτική έλλειψη χιονοκάλυψης για αυτόν το μήνα. Τον Ιανουάριο(εικόνα 20γ), αντίστοιχα με το ύψος χιονιού, έτσι και η χιονοκάλυψη παρουσιάζει μια τάση αύξησης στα πεδινά της κεντρικής και βορειοανατολικής Ελλάδας κατά την περίοδο 1991-2020 ενώ αρνητική τάση εμφανίζεται και πάλι σε ορεινές περιοχές της βόρειας και βορειοδυτικής Ελλάδας και είναι στατιστικά σημαντική στα μεγάλα υψόμετρα της οροσειράς της Πίνδου, στην περιοχή της Ηπείρου και της Δυτικής Μακεδονίας. Τους μήνες Φεβρουάριο (Σχήμα 20δ) και Μάρτιο (Σχήμα 20ε), φαίνεται, οι αρνητικές τάσεις να εμφανίζονται κατα κύριο λόγο στα πιο κεντρικά και νότια τμήματα της χώρας, με έμφαση τις περιοχές της Στερεάς Ελλάδας και της Πελοποννήσου. Τέλος, κατά το μήνα Απρίλιο (Σχήμα 20ζ), στατιστικά σημαντική συρρίκνωση της περιόδου με χιονοκάλυψη παρατηρήθηκε στα μεγάλα υψόμετρα της οροσειράς της Πίνδου σε όλο σχεδόν το μήκος της καθώς και στα ορεινά της κεντρικής Μακεδονίας, της Μαγνησίας και της Φθιώτιδας.





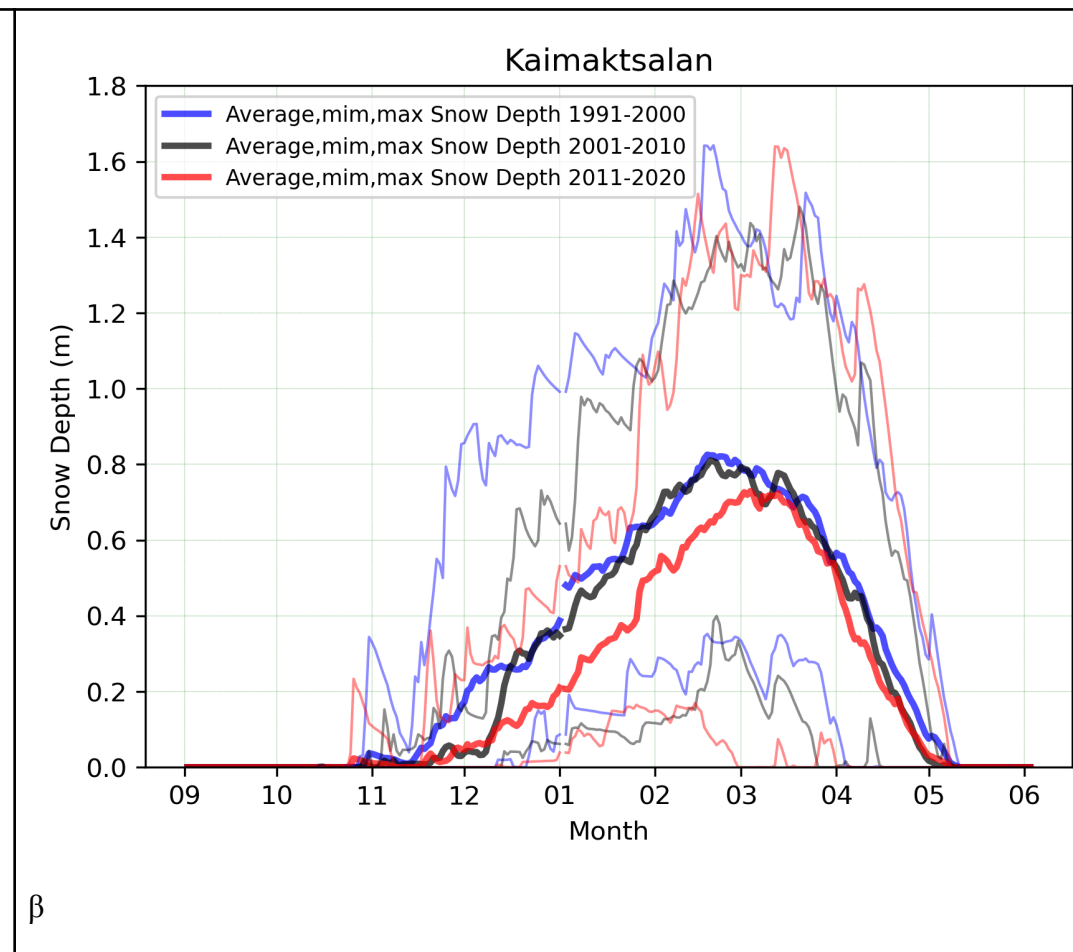
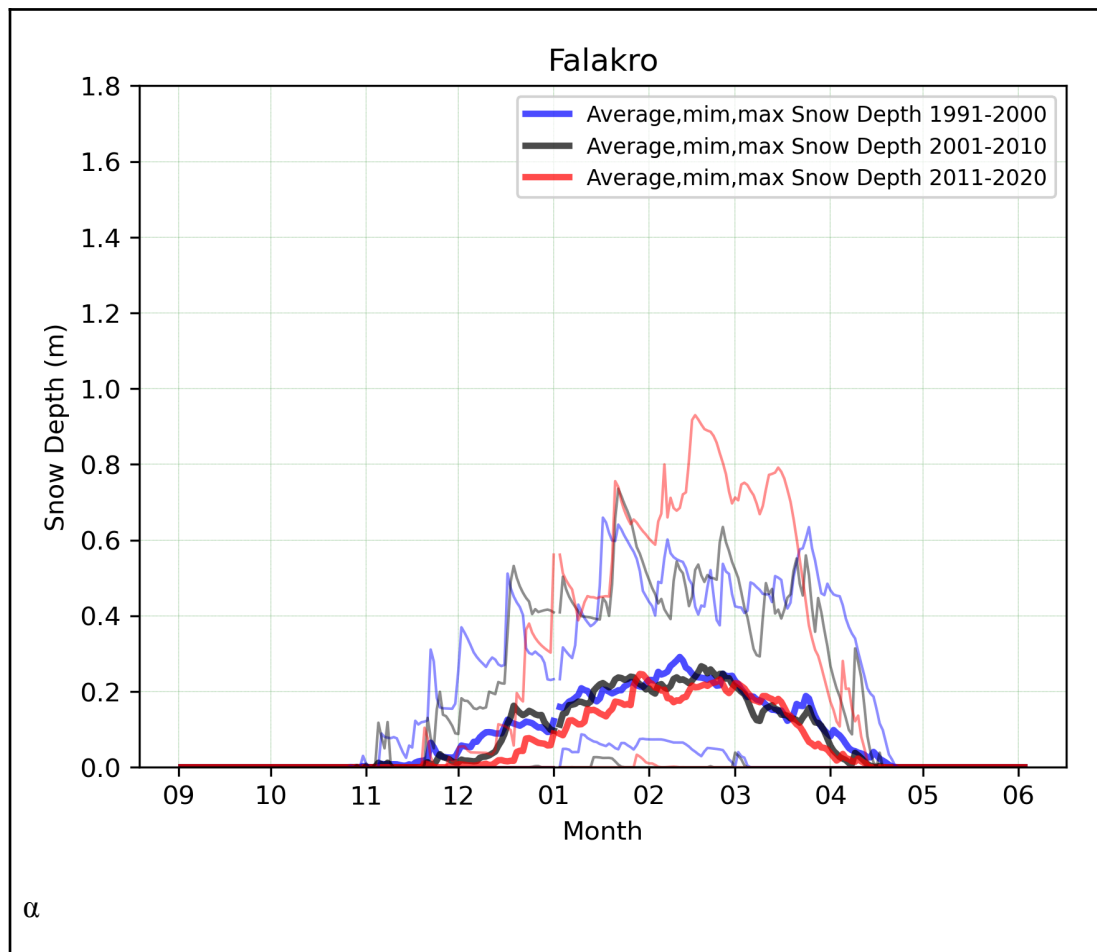
Σχήμα 20. Χάρτες διαχρονικής τάσης μέσου ετήσιου αριθμού ημερών με χιονοκάλυψη την περίοδο 1991-2020, για τους μήνες Νοέμβριο (α), Δεκέμβριο (β), Ιανουάριο (γ), Φεβρουάριο (δ), Μάρτιο (ε) και Απρίλιο (ζ).

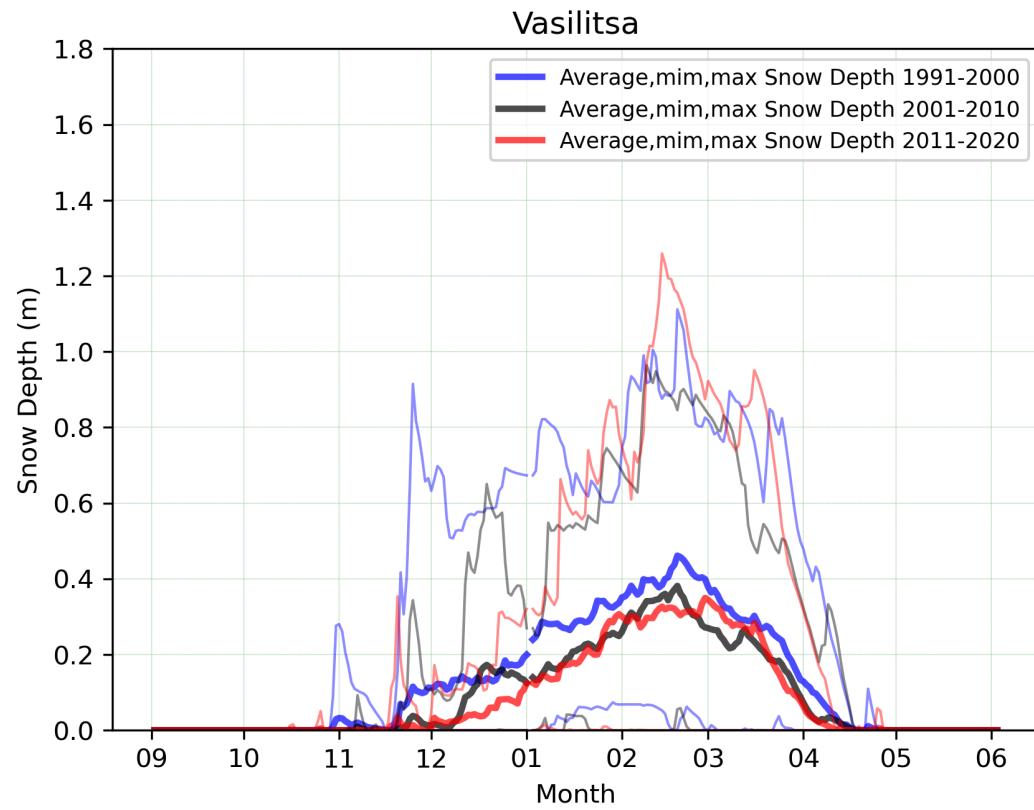
3.1.3 Χιονοδρομικά κέντρα

Η διαχρονική μεταβολή των συνθηκών χιονόπτωσης και χιονοκάλυψης είναι, όπως τονίστηκε και στην εισαγωγή, σαφώς καταλυτικός παράγοντας στην ανάπτυξη ορισμένων περιοχών, σε τουριστικά και κατ επέκταση σε οικονομικά πλαίσια. Συνεπώς, στην παρούσα εργασία, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στους χειμερινούς προορισμούς της Ελλάδας για τη εξέταση της βιωσιμότητας τους όσον αφορά την εξάρτηση τους από τις συνθήκες χιονιού. Αναλυτικότερα, για επιλεγμένα χιονοδρομικά κέντρα της χώρας, υπολογίστηκε για κάθε δεκαετία ξεχωριστά, η μέση τιμή ύψους χιονιού για κάθε ημέρα του έτους καθώς και η μέγιστη και ελάχιστη τιμή που σημειώθηκε την ημέρα αυτή κατά την διάρκεια της εκάστοτε δεκαετίας. Η επιλογή των χιονοδρομικών κέντρων έγινε με βάση την συσχέτιση του πραγματικού τους υψομέτρου με το υψόμετρο που αποδίδεται από την ανάλυση δεδομένων του μοντέλου Cerra-Land.

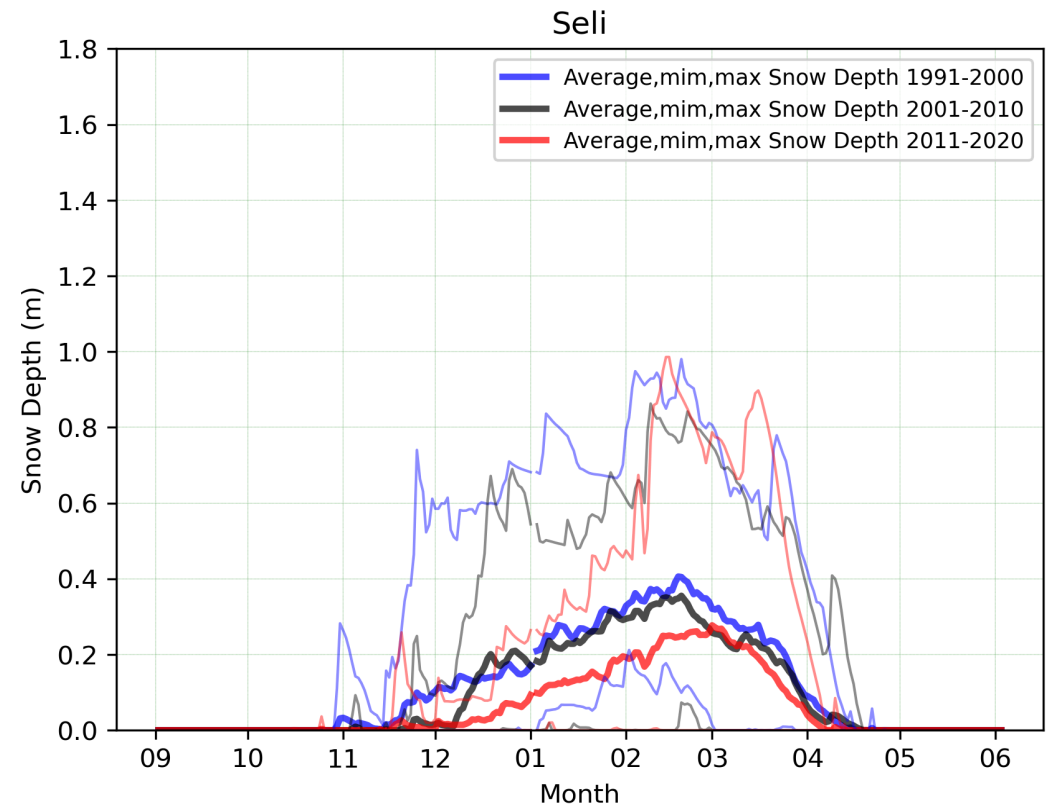
Τα διαγράμματα του Σχήματος 21 απεικονίζουν την ενδο-ετήσια διακύμανση του μέσου ημερήσιου ύψους χιονιού, καθώς και τις μέγιστες και ελάχιστες ημερήσιες τιμές, σε κάθε χιονοδρομικό κέντρο, για κάθε δεκαετία ξεχωριστά. Είναι εμφανές σε όλα τα διαγράμματα, ότι το μέσο ύψος χιονιού έχει μειωθεί σημαντικά την τελευταία δεκαετία της ανάλυσης, καθώς στο σύνολο των χιονοδρομικών η κόκκινη γραμμή βρίσκεται σε κατώτερα επίπεδα από την μπλε και τη μαύρη που αποδίδουν τις τιμές του ημερήσιου ύψους χιονιού για τις δεκαετίες 1991-2000 και 2001-2010 αντίστοιχα. Ένα κοινό εύρημα που εμφανίζεται κυρίως στα χιονοδρομικά της κεντρικής και βόρειας Ελλάδας (Σχήμα 21α,β,γ,δ,ε,ζ,η), είναι η εντονότερη μείωση του ύψους χιονιού κατά την έναρξη της χειμερινής περιόδου και πιο συγκεκριμένα την περίοδο Νοεμβρίου έως τα μέσα Ιανουαρίου όπου το μέσο ύψος χιονιού εμφανίζει μεγάλη απόκλιση κατά την τελευταία δεκαετία σε σύγκριση με τις 2 προηγούμενες, ενώ από τον Φεβρουάριο και έπειτα, στα περισσότερα χιονοδρομικά οι τιμές κυμαίνονται σχετικά κοντά στις προηγούμενες δεκαετίες έως και ελαφρώς χαμηλότερα. Αντίθετα, στα χιονοδρομικά της κεντρικής και νότιας χώρας όπως ο Παρνασσός, το Καρπενήσι και τα Καλάβρυτα, η απόκλιση στην έναρξη της χειμερινής περιόδου είναι μικρότερη και φαίνεται να αυξάνεται από τα τέλη Φεβρουαρίου και έπειτα. Εξαίρεση αποτελεί το χιονοδρομικό κέντρο του Καρπενησίου, όπου τους μήνες Μάρτιο και Απρίλιο η

χιονοκάλυψη βρίσκεται σε αντίστοιχα επίπεδα με τις δύο προηγούμενες δεκαετίες. Επίσης, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως στα χιονοδρομικά της βόρειας χώρας (Φαλακρό, Καιμακτσαλαν, Βασιλίτσα και Ανήλιο), την δεκαετία 2011-2020, παρά τις χαμηλές μέσες τιμές του ύψους χιονιού, σημειώθηκαν μέγιστες τιμές ρεκόρ κατα το μήνα Φεβρουάριο, οι οποίες ξεπερνούσαν τα ρεκόρ των προηγούμενων δεκαετιών. Αυτό δεν συμβαίνει και στα χιονοδρομικά της νότιας χώρας όπου οι μέγιστες ημερήσιες τιμές της τελευταίας δεκαετίας είναι σημαντικά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες τιμές των δεκαετιών 1991-2000 και 2001-2010



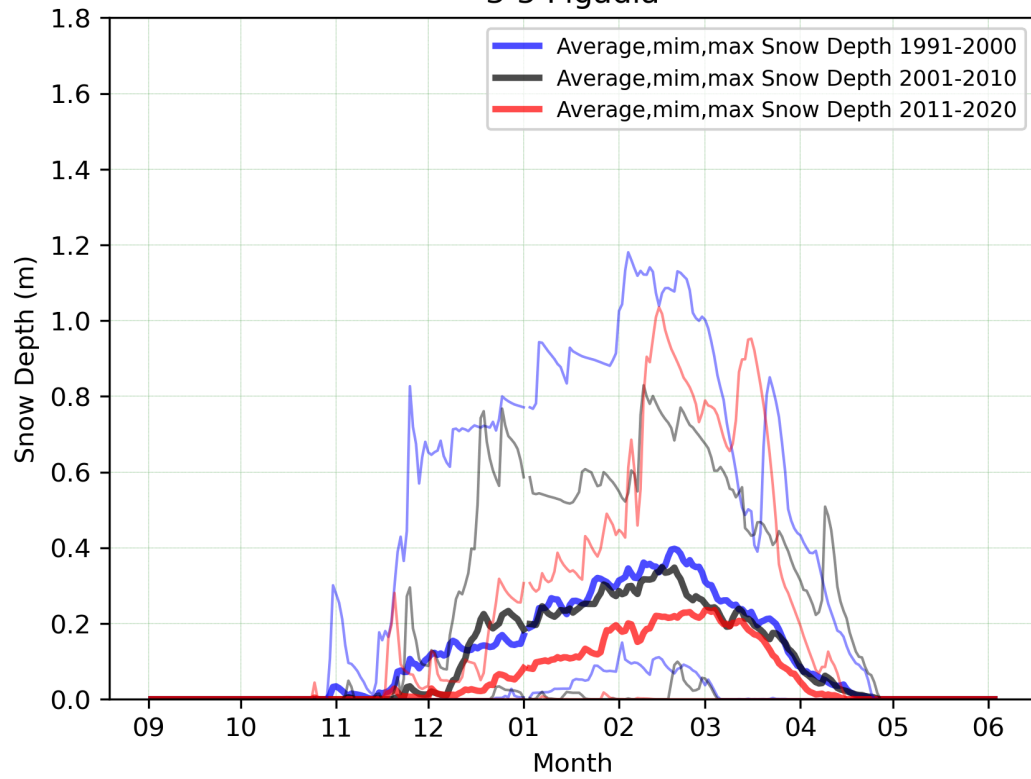


γ

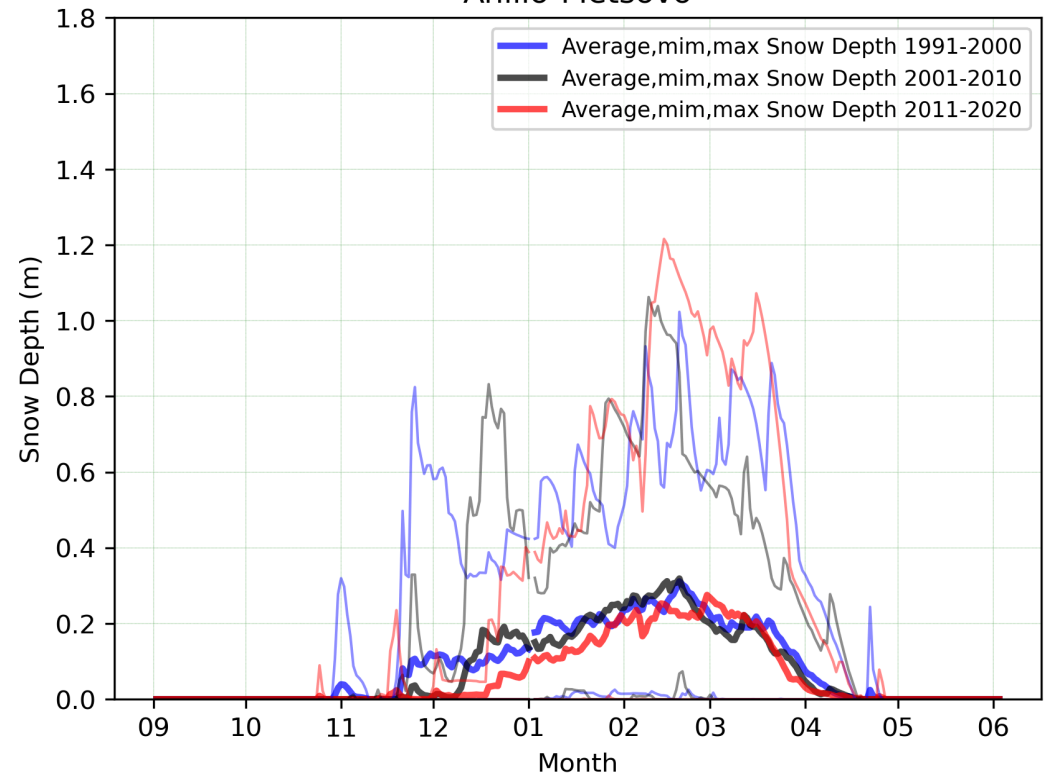


δ

3-5 Pigadia

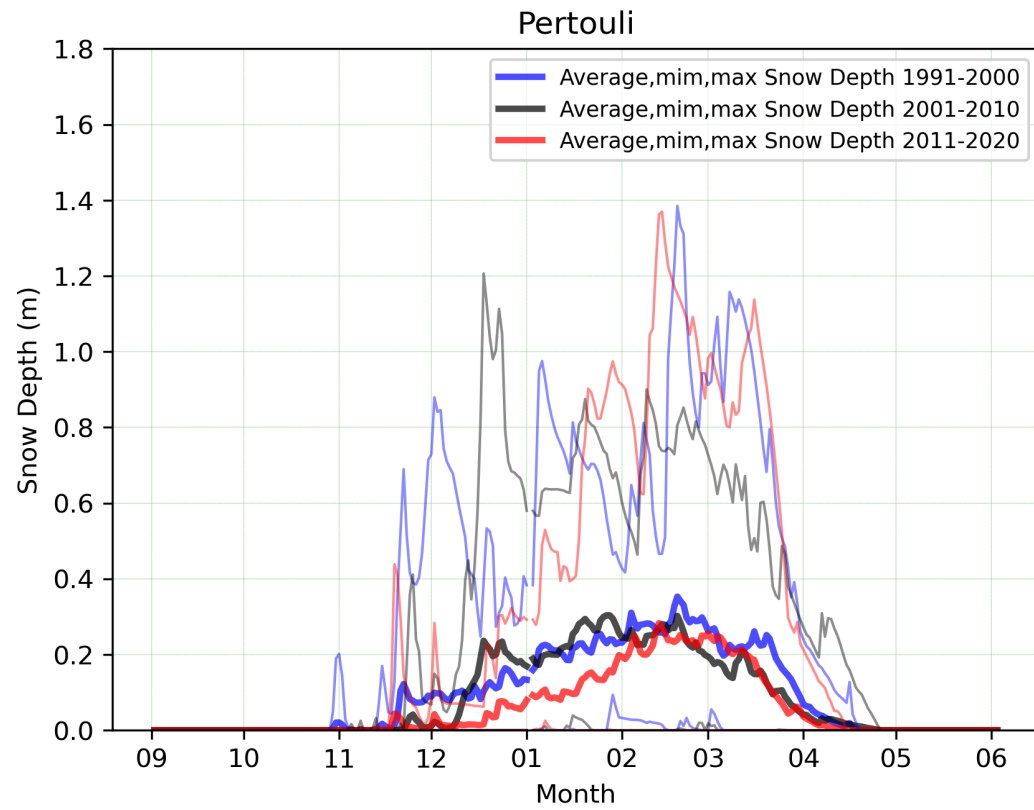


Anilio-Metsovo

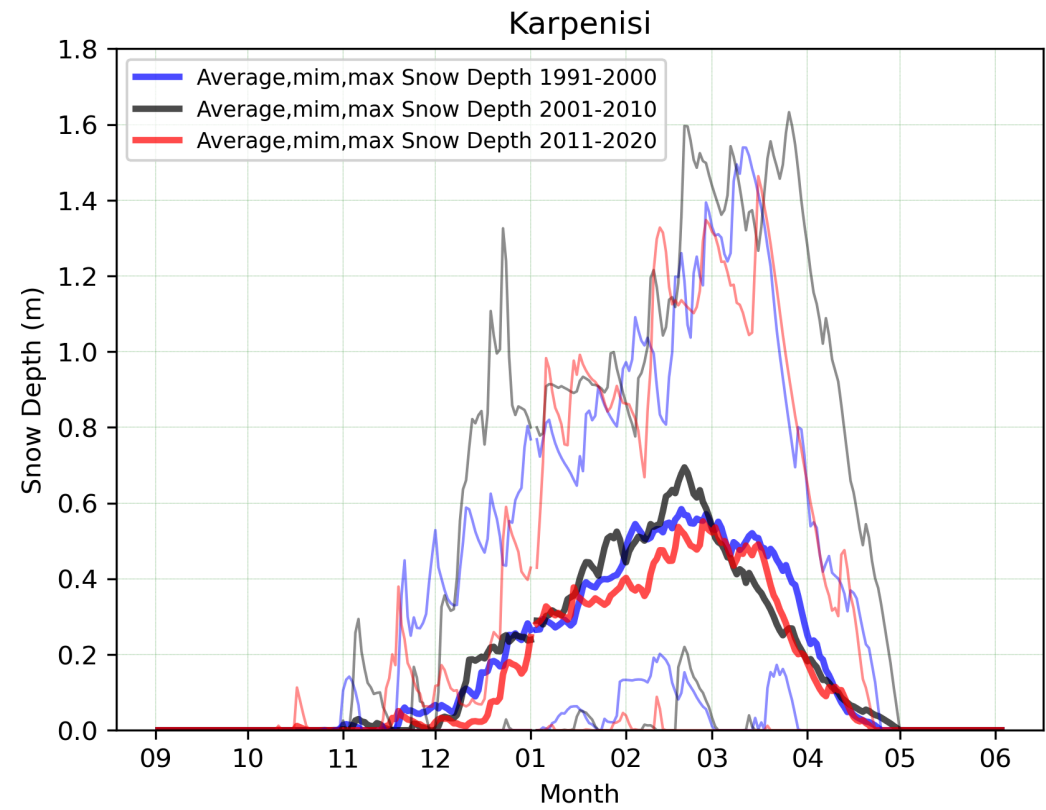


ε

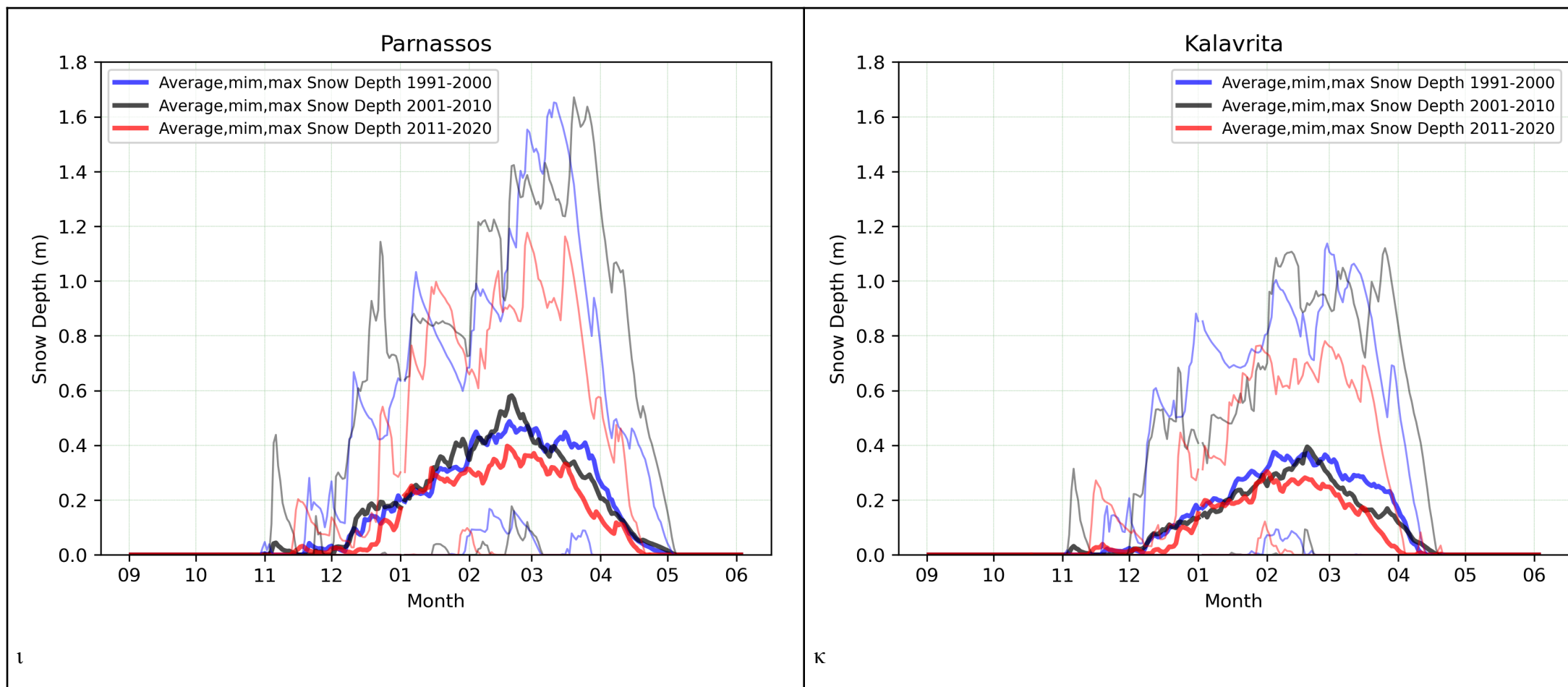
ζ



η



θ



Σχήμα 21. Μέση ενδο-ετήσια διακύμανση ύψους χιονιού κατά τις δεκαετίες 1991-2000, 2001-2010 και 2011-2020 στα χιονοδρομικά: (α) Φαλακρό, (β) Καιμακτσαλάν, (γ) Βασιλίτσα, (δ) Σέλι, (ε) 3-5 Πηγάδια, (ζ) Ανήλιο, (η) Περτούλι, (θ) Καρπενήσι, (ι) Παρνασσός και (κ) Καλάβρυτα.

Η συρρίκνωση της συνολικής περιόδου με χιονοκάλυψη είναι διακριτή σε όλα τα διαγράμματα. Ωστόσο πραγματοποιήθηκε και ο ακριβής υπολογισμός απώλειας ημερών με χιονοκάλυψη για κάθε χιονοδρομικό κέντρο και τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 2. Τα υψόμετρα που παρατίθενται στον Πίνακα 2, αφορούν το μέσο υψόμετρο που αποδίδει το μοντέλο CERRA-Land στο εκάστοτε χιονοδρομικό και όχι το πραγματικό τους υψόμετρο. Σε όλα τα χιονοδρομικά εμφανίζεται μια μείωση <-5% κατά την τελευταία δεκαετία σε σύγκριση με την κλιματική τιμή, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις το ποσοστό μείωσης αγγίζει το -20%. Πιο αναλυτικά, οι σημαντικότερες μεταβολές, φαίνεται να εντοπίζονται στα χιονοδρομικά που βρίσκονται σε χαμηλότερα υψόμετρα καθώς σε 5 από τα 7 χιονοδρομικά με μέσο υψόμετρο μικρότερο από 1500 μέτρα παρουσιάζουν μια μείωση της τάξεως 13-20% με τα πιο αρνητικά ποσοστά να βρίσκονται στα χιονοδρομικά της Θράκης (Φαλακρό), της Θεσσαλίας (Περτούλι), της Μακεδονίας (Σέλι και 3-5 Πηγάδια) και της Ηπείρου (Ανήλιο). Παράλληλα, στα αντίστοιχα υψόμετρα των νοτιότερων τμημάτων της χώρας η μείωση της χιονοκάλυψης φαίνεται να είναι μικρότερη κυμαινόμενη σε ποσοστά της τάξεως -7% έως -9% στα χιονοδρομικά του Παρνασσού και του Καρπενησίου. Όσον αφορά τα χιονοδρομικά με μέσο υψόμετρο >1500 μέτρα, τα ποσοστά μείωσης βρίσκονται μεταξύ -6% και -12% και συγκρίνοντας αντίστοιχα υψόμετρα προκύπτει πάλι, ότι η μεγαλύτερη μείωση εμφανίζεται στα χιονοδρομικά της βόρειας χώρας (Βασιλίτσα, Καιμακτσαλάν).

Πίνακας 2. Κλιματικές τιμές διάρκειας χιονοκάλυψης σε κάθε χιονοδρομικό για τις περιόδους 1991-2020, 1991-2000, 2001-2010 και 2011-2020, και μεταβολή της χιονοκάλυψης κατά την τελευταία δεκαετία σε σύγκριση με την κλιματική τιμή.

Χιονοδρομικό κέντρο	Υψόμετρο μοντέλου (m)	Μέσος αριθμός ημερών με χιονοκάλυψη	Μέσος αριθμός ημερών με χιονοκάλυψη	Μέσος αριθμός ημερών με χιονοκάλυψη	Μέσος αριθμός ημερών με χιονοκάλυψη	Ποσοστιαία αποχή αρ. ημερών (%) της περιόδου
---------------------	-----------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	--

		τη δεκαετία 1991-2020	τη δεκαετία 1991-2000	τη δεκαετία 2001-2010	την δεκαετία 2011-2020	2011-2020 από την κλιματική τιμή (1991-2020)
Φαλακρό	1286.7	90.07	107.4	90.2	72.6	-19.39
Καϊμακτσαλάν	1735.4	142.93	151.7	143	134.1	-6.18
Βασιλίτσα	1515	97.27	111.3	94.4	86.1	-11.48
Σέλι	1404.6	94.0	109	94.9	78.1	-16.91
3-5 Πηγάδια	1366.9	98.6	111.9	101.9	82	-16.84
Ανήλιο	1414.5	89.17	98	92.1	77.4	-13.2
Περτούλι	1156.1	87.87	99.9	91.1	72.6	-17.37
Καρπενήσι	1487.7	105.83	118.5	100.7	98.3	-7.12
Παρνασσός	1474.7	100.3	110.2	99.3	91.4	-8.87
Καλάβρυτα	1557.6	81.0	91	76.3	75.7	-6.54

Στον Πίνακα 3, παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές του μέσου ημερήσιου ύψους χιονιού που σημειώθηκε την περίοδο Σεπτέμβριος - Μάιος, για κάθε δεκαετία της ανάλυσης δεδομένων. Μια σταδιακή μείωση διαπιστώνεται σε όλα τα χιονοδρομικά ανεξαρτήτως γεωγραφικού πλάτους. Ωστόσο, η κύρια διαφορά μεταξύ βορρά και νότου, έγκειται στην μεταβολή κατά τη δεκαετία 2001-2010 σε σύγκριση με την δεκαετία 1991-2000. Πιο συγκεκριμένα, στα χιονοδρομικά της Βόρειας Ελλάδας κατά την δεύτερη δεκαετία της περιόδου, παρουσιάστηκε μια μικρή μείωση σε σύγκριση με την δεκαετία 1991-2000 με εξαίρεση το χιονοδρομικό κέντρο Ανηλίου στην Ήπειρο όπου διακρίνεται μια σταθερότητα. Από την άλλη μεριά, την περίοδο 2001-2010, στα χιονοδρομικά της Πελοποννήσου και κυρίως της Στερεάς Ελλάδας, η μέγιστη τιμή της μέσης ημερήσιας χιονοκάλυψης εμφανίζει σημαντικά υψηλότερες τιμές σε σχέση με την πρώτη δεκαετία. Ωστόσο, ακόμα και σε αυτές τις περιπτώσεις, κατά την δεκαετία 2011-2020 παρατηρήθηκε πολύ σημαντική απώλεια χιονιού με τις τιμές να πέφτουν στα χαμηλότερα επίπεδα όλων των δεκαετιών.

Πίνακας 3. Μέγιστο ημερήσιο ύψος χιονιού κατά μέσο όρο για την περίοδο Σεπτέμβριος - Μάιος ανά δεκαετία.

Χιονοδρομικό κέντρο	Μέγιστο ημερήσιο ύψος χιονιού για τη δεκαετία 1991-2000 (m)	Μέγιστο ημερήσιο ύψος χιονιού για τη δεκαετία 2001-2010 (m)	Μέγιστο ημερήσιο ύψος χιονιού για τη δεκαετία 2011-2020 (m)
Φαλακρό	0.29	0.27	0.25
Καιμακτσαλάν	0.83	0.81	0.73
Βασιλίτσα	0.46	0.38	0.35
Σέλι	0.41	0.36	0.28
3-5 Πηγάδια	0.40	0.35	0.24
Ανήλιο	0.31	0.32	0.28
Περτούλι	0.35	0.3	0.28
Καρπενήσι	0.58	0.69	0.55
Παρνασσός	0.49	0.58	0.40
Καλάβρυτα	0.37	0.39	0.30

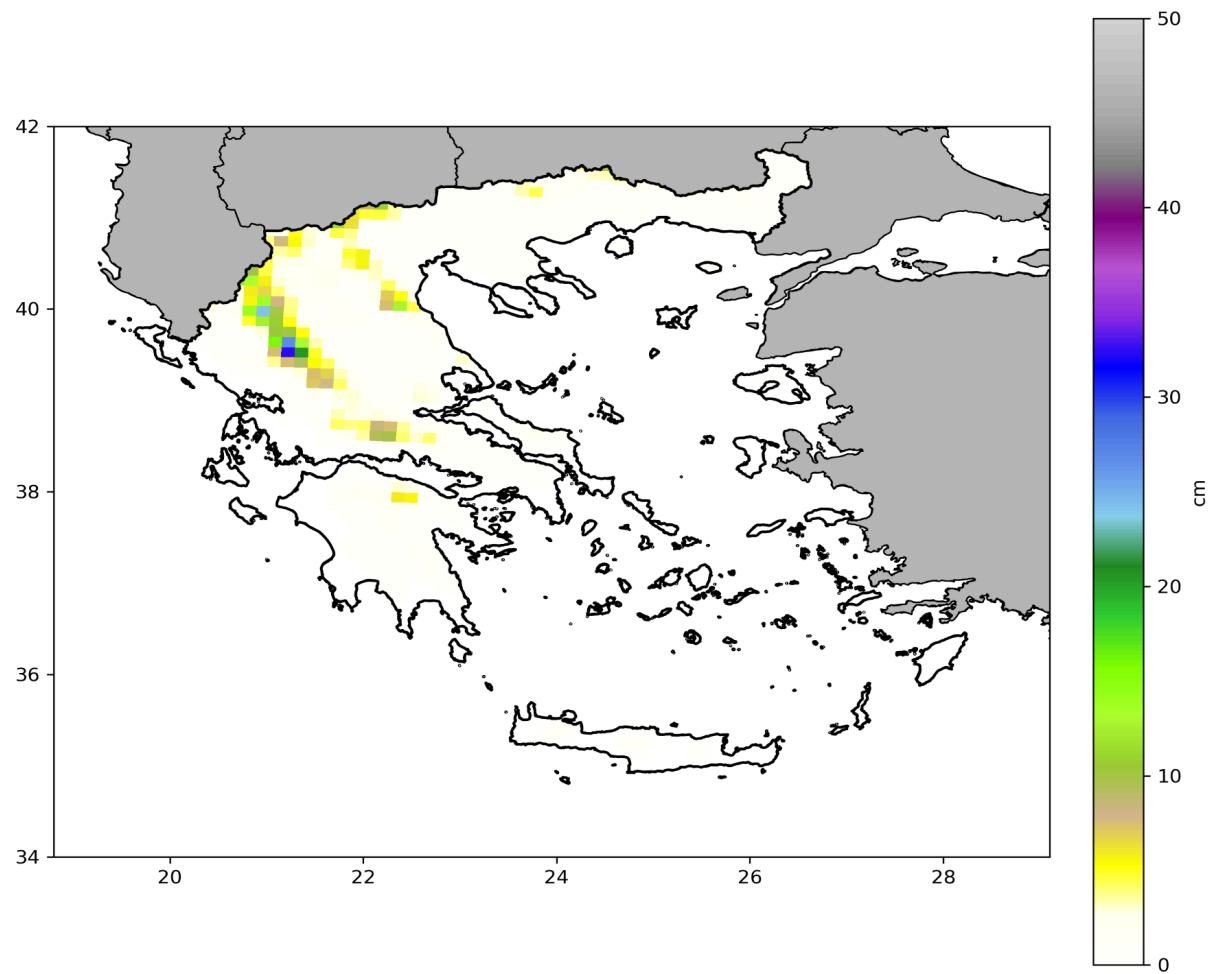
3.2 Χαρακτηριστικά χιονοκάλυψης μελλοντικό κλίμα

3.2.1 Ύψος χιονιού

Η διαχρονική τάση μείωσης της χιονοκάλυψης κατα την διάρκεια της τελευταίας τριακονταετίας σε συνδυασμό με την επικείμενη τάση αύξησης της θερμοκρασίας που προβλέπεται (IPCC, 2022; Pielke et al., 2022), υποδεικνύουν την διατήρηση αυτής της

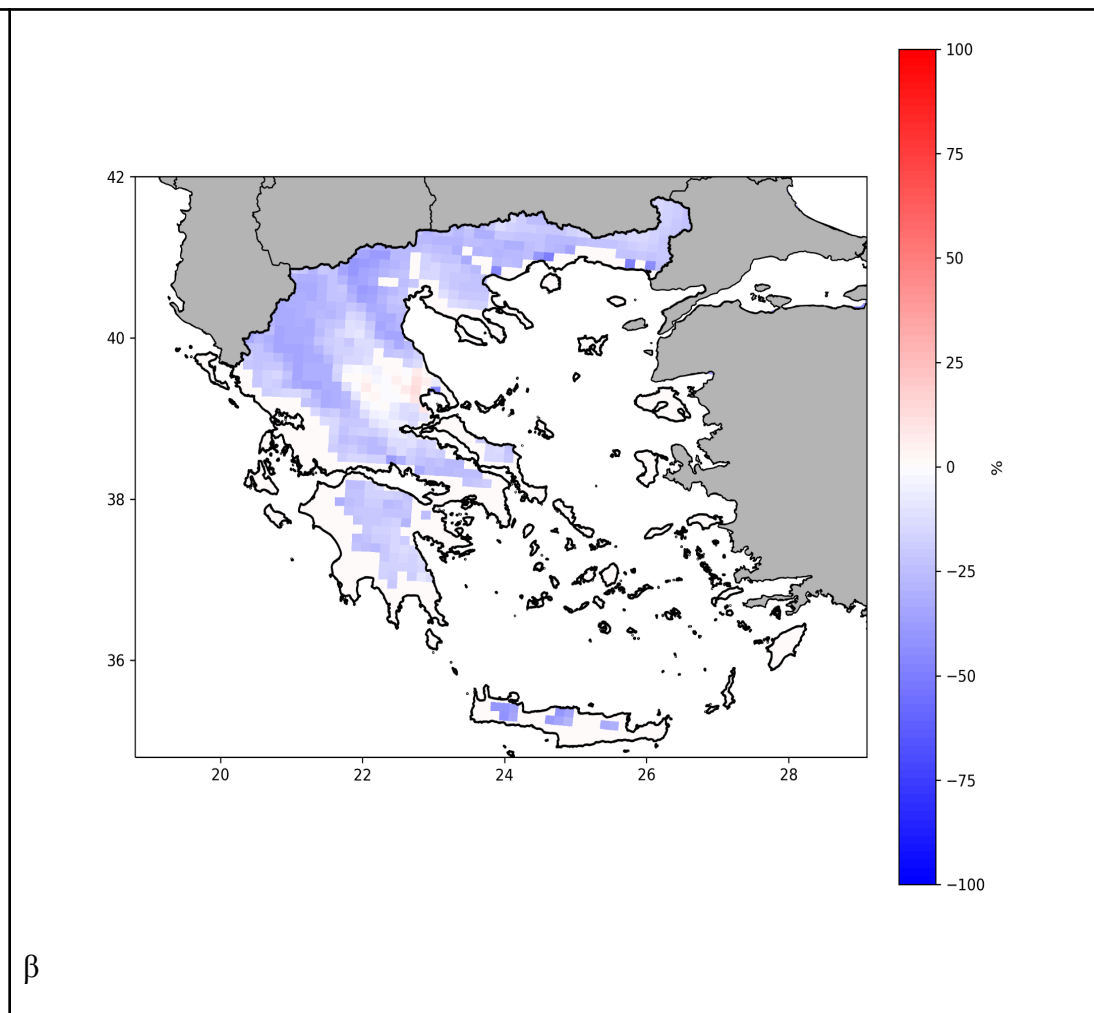
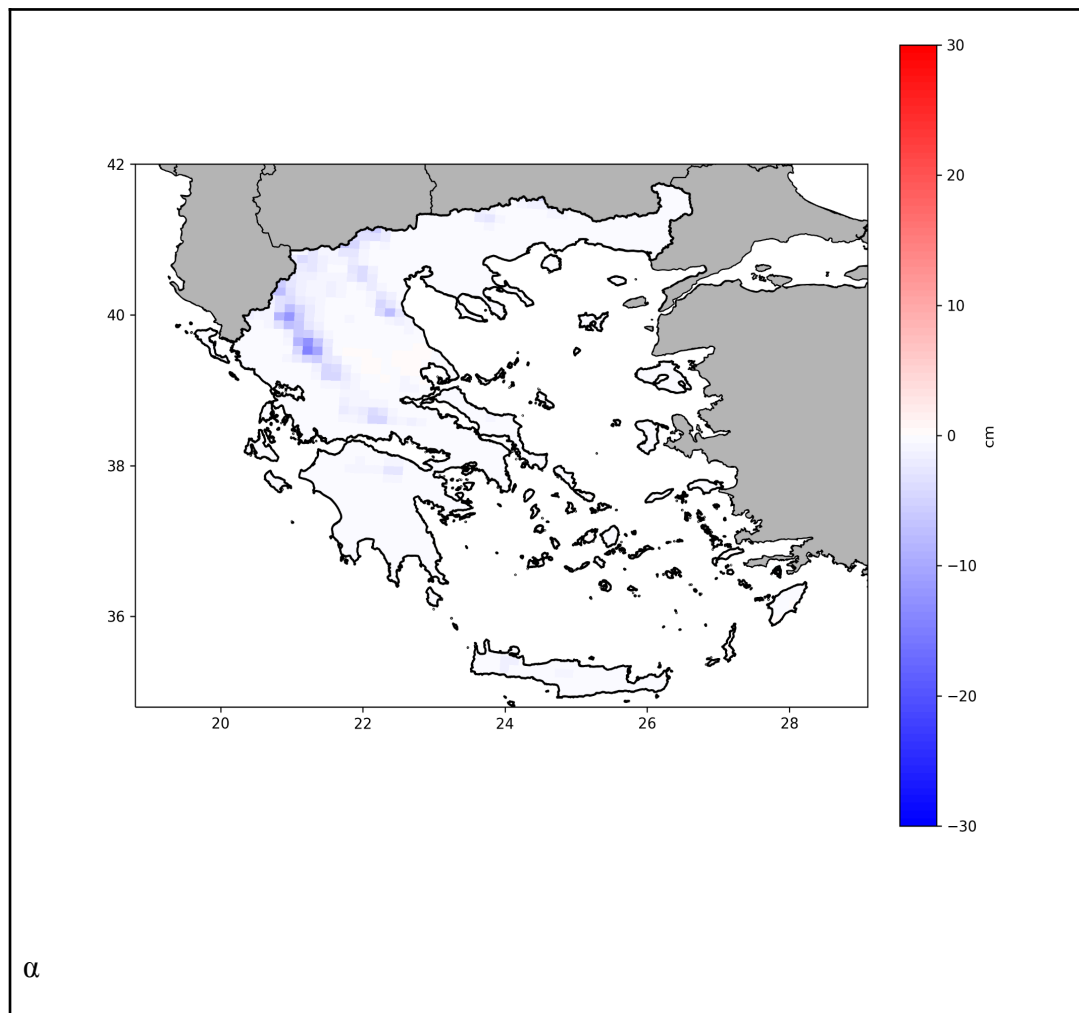
αρνητικής τάσης και στα επόμενα έτη. Για την εξακρίβωση αυτού του ισχυρισμού, χρησιμοποιήσαμε τις προβλέψεις των κλιματικών προσομοιώσεων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, για τον προσδιορισμό των μελλοντικών συνθηκών χιονιού κατά την περίοδο 2031-2060. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα για δυο πιθανά σενάρια εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Πιο συγκεκριμένα, αντλήθηκαν δεδομένα για τα σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5 και κατά την ανάλυση υπολογίστηκε ο μέσος όρος των προβλέψεων της χιονοκάλυψης για κάθε μέρα των περιόδων 1991-2020 και 2031-2060, συνδυάζοντας όλα τα σενάρια προσομοιώσεων που παρατέθηκαν στον πίνακα 1. Έπειτα από τον υπολογισμό του μέσου ύψους χιονιού για την περίοδο 1991-2020 (Σχήμα 22), προσδιορίστηκαν οι προβλεπόμενες αποκλίσεις της περιόδου 2031-2060 από τις παρούσες κλιματικές τιμές (Σχήμα 23), ενώ παράλληλα δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στα χιονοδρομικά κέντρα.

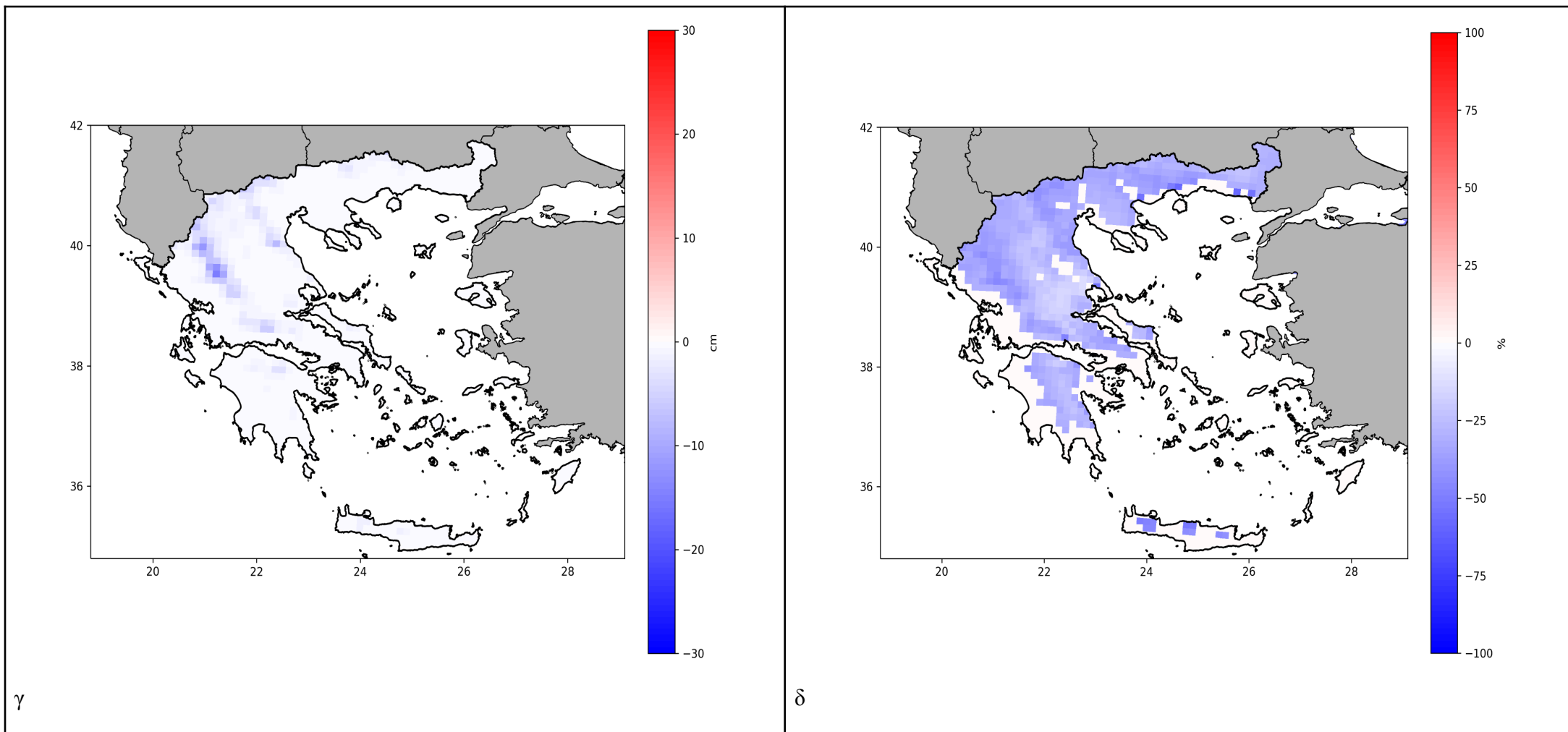
Αναλυτικότερα, αρχικά προσδιορίστηκε η κλιματική τιμή του ύψους χιονιού που αποδίδει ο μέσος όρος των προσομοιώσεων για την περίοδο Δεκέμβριος - Μάρτιος των ετών 1991-2020 όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 23. Στο Σχήμα 23, φαίνεται, όπως ήταν αναμενόμενο, πως οι μεγαλύτερες τιμές ύψους χιονιού εντοπίζονται στις πιο ορεινές περιοχές της βόρειας και κεντρικής Ελλάδας με την οροσειρά της Πίνδου να συγκεντρώνει έως και πάνω από 30 εκατοστά χιονιού κατά μέσο όρο. Από την άλλη, τα νοτιότερα πεδινά και παραθαλάσσια τμήματα εμφανίζουν πολύ χαμηλές έως και μηδενικές τιμές.



Εικόνα 22. Χάρτης μέσων ύψους χιονιού για την περίοδο Δεκέμβριος - Μάρτιος, της 30ετίας 1991-2020, σύμφωνα με τον μέσο όρο των προγνώσεων των 8 κλιματικών μοντέλων.

Στη συνέχεια, έγινε ο αντίστοιχος υπολογισμός για την περίοδο 2031-2060 και για τα δύο πιθανά σενάρια εκπομπών και βρέθηκε η διαφορά τους από την παροντική κλιματική τιμή τόσο σε απόλυτο αριθμό, όσο και σε ποσοστό επί τις εκατό (%). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 23, και υποδεικνύουν και στα 2 σενάρια, μια γενικευμένη και εκτεταμένη μείωση του μέσου ύψους χιονιού σε βάθος χρόνου, με τις σημαντικότερες απώλειες να εμφανίζονται στην βορειοδυτική Ελλάδα και κυρίως στην περιοχή της δυτικής Μακεδονίας και της Ηπείρου όπου στο σενάριο RCP 4.5 αγγίζουν το -30% και στην περίπτωση RCP 8.5 φτάνουν έως και -45%. Μοναδική εξαίρεση φαίνεται να αποτελεί ένα περιορισμένο τμήμα της πεδινής Θεσσαλίας όπου σύμφωνα με το σενάριο εκπομπών RCP - 4.5 παρατηρείται μια ελαφρώς θετική απόκλιση της τάξεως του +10%, η οποία πιθανόν να οφείλεται σε σφάλμα των δεδομένων.

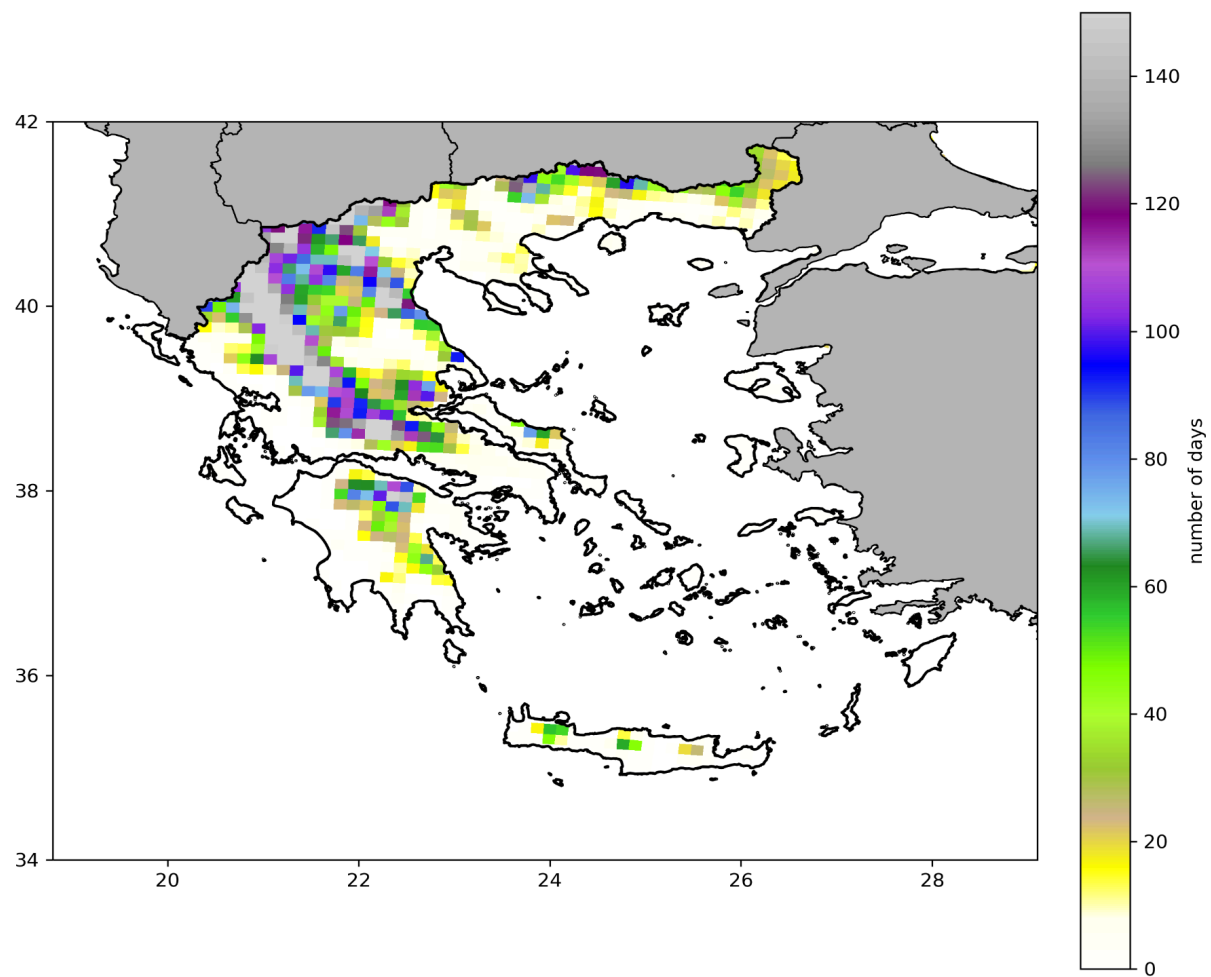




Χάρτες αποχών του μέσου ημερήσιου ύψους χιονιού για την περίοδο Δεκέμβριος-Φεβρουάριος της 30ετίας 2031-2060 σε σύγκριση με την κλιματική τιμή της περιόδου 1991-2020, σύμφωνα με τον μέσο όρο των 8 κλιματικών μοντέλων που επιλέχθηκαν για τα 2 πιθανά κλιματικά σενάρια RCP 4.5 (α,β) και RCP 8.5 (γ,δ)

3.2.2 Έκταση και διάρκεια χιονοκάλυψης

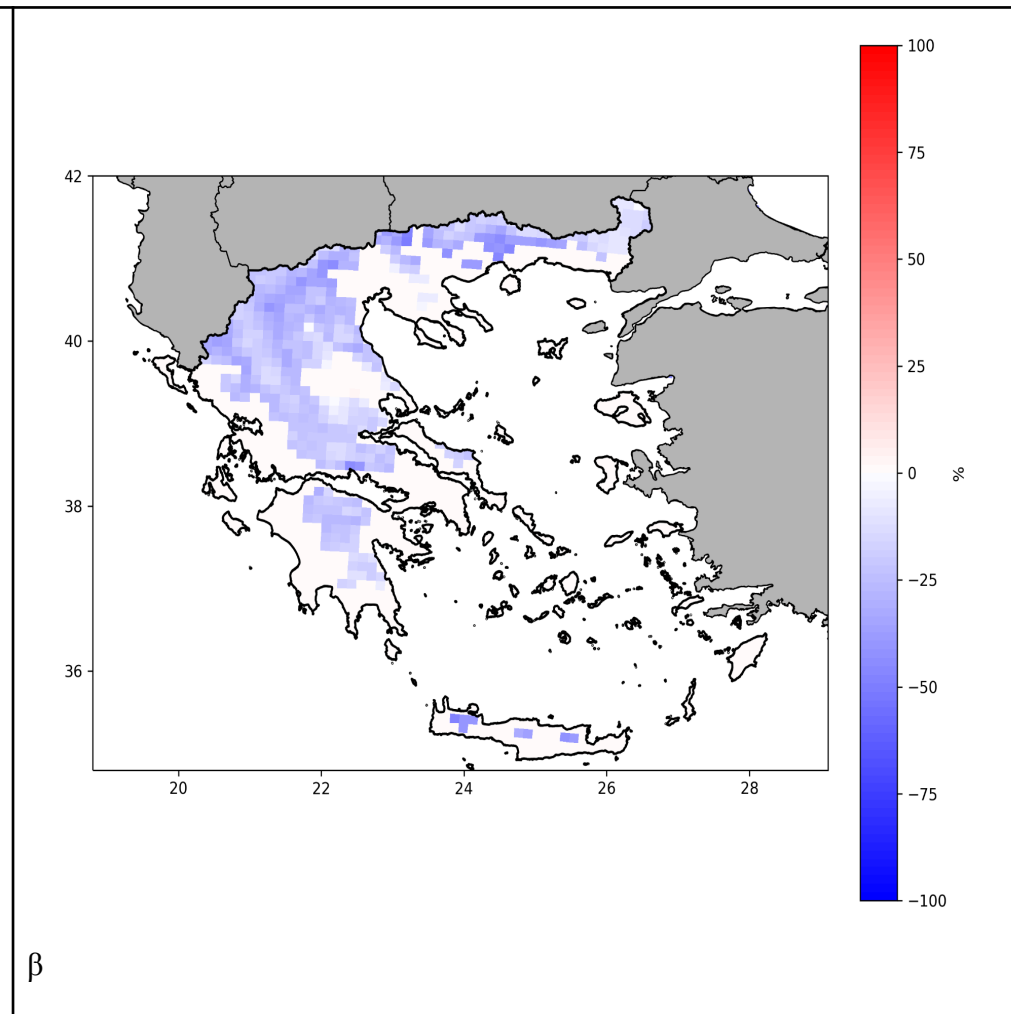
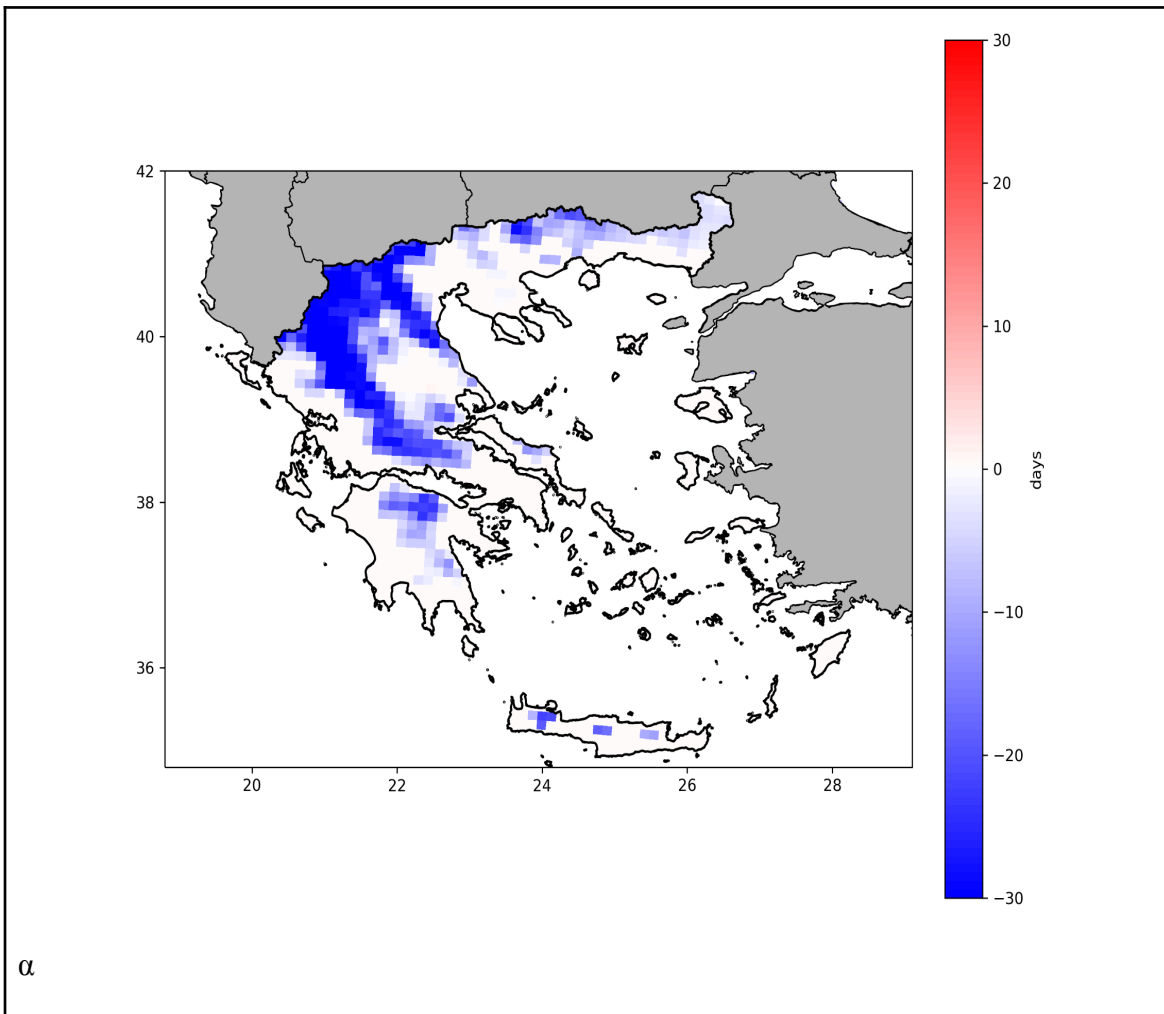
Η κλιματική τιμή του μέσου αριθμού ημερών με χιονοκάλυψη (ύψος χιονιού > 0 εκ) καθώς και η χωρική της έκταση σύμφωνα με τον μέσο όρο των κλιματικών προσομοιώσεων που χρησιμοποιήθηκαν, παρουσιάζεται στο Σχήμα 24 και έρχεται σε σχετική συμφωνία με το Σχήμα 13 όσον αφορά την χωρική και χρονική κατανομή του χιονιού, εμφανίζοντας τις περισσότερες ημέρες με χιονοκάλυψη κατα μήκος της οροσειράς της Πίνδου, οι οποίες στα μεγάλα υψόμετρα ξεπερνούν τις 120 ημέρες ανα έτος. Από την άλλη, οι λιγότερες ημέρες με χιονοκάλυψη απαντώνται στα πεδινά και παραθαλάσσια τμήματα της χώρας.

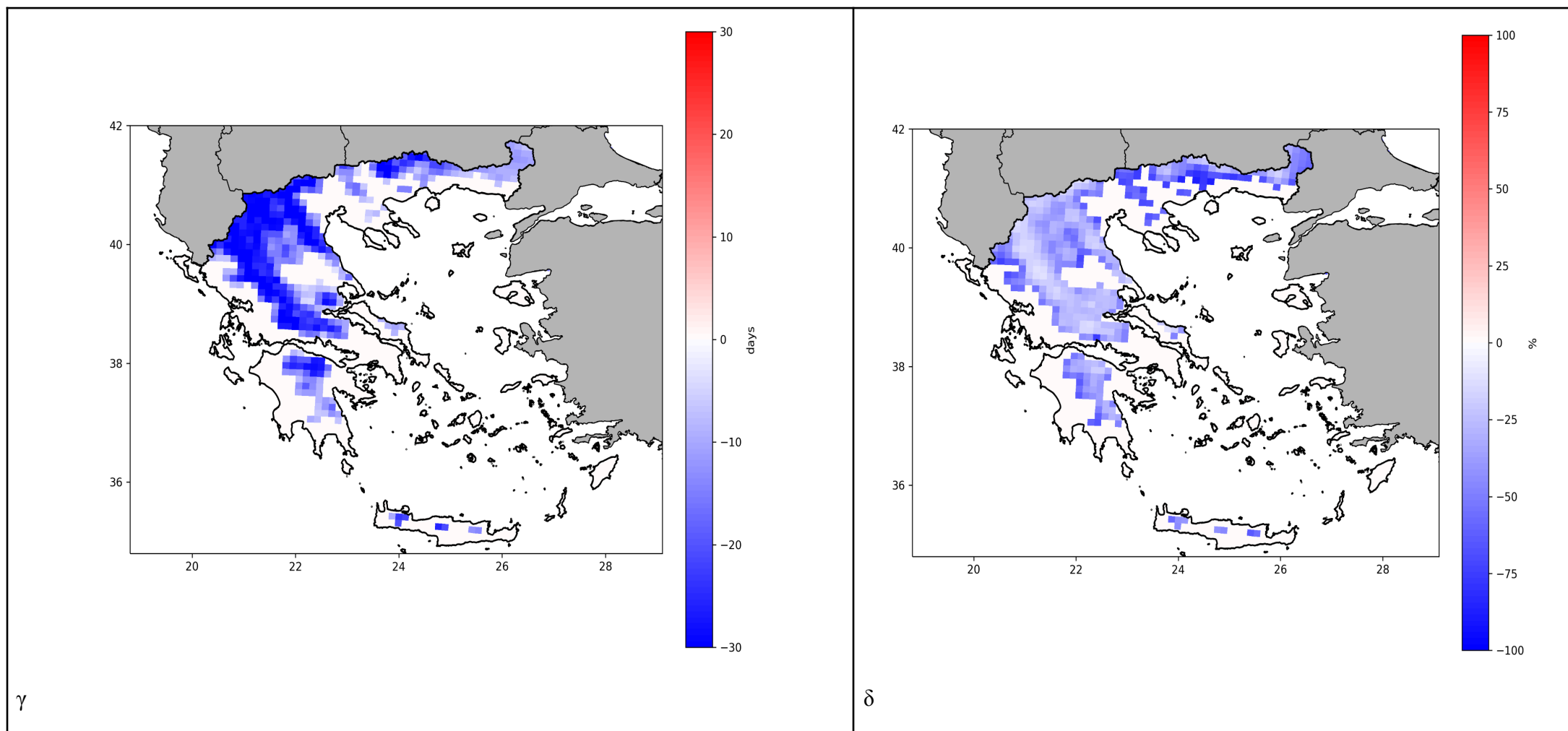


Σχήμα 24. Χάρτης μέσου ετήσιου αριθμού ημερών με χιονοκάλυψη για την περίοδο Σεπτέμβριος - Μάιος, σύμφωνα με τον μέσο όρο των 8 κλιματικών προσομοιώσεων για την 30-ετία 1991-2020.

Αντίστοιχος υπολογισμός έγινε και για την περίοδο 2031-2060 και για τα δύο πιθανά σενάρια εκπομπής CO₂. Τα αποτελέσματα για το 1ο σενάριο (RCP 4.5) υποδεικνύουν μια εκτεταμένη μείωση, η οποία αγγίζει έως και τις 20 μέρες ετησίως σε όλα τα ορεινά τμήματα της Ελλάδας και κυρίως στις ορεινές και ημιορεινές περιοχές της κεντρικής και βόρειας χώρας (Σχήμα 25α,β). Η μεγαλύτερη ποσοστιαία ελάττωση, εντοπίζεται στη βορειοανατολική χώρα, στις περιοχές της ανατολικής Μακεδονίας και της Θράκης και αγγίζει ποσοστά έως και -50%.

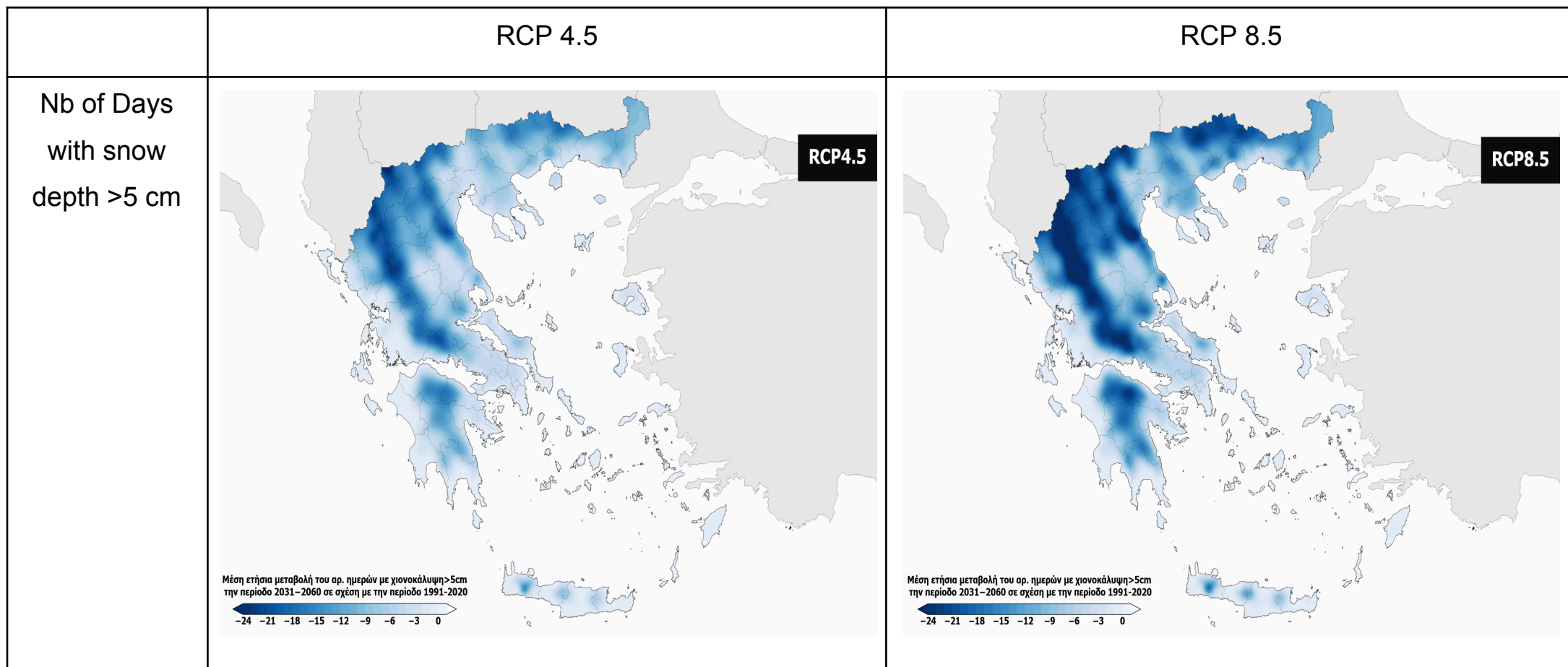
Τα αποτελέσματα για το 2ο σενάριο (RCP 8.5) δείχνουν πολύ μεγάλη μείωση σε όλη την έκταση της χώρας, με τις ορεινές περιοχές να υπολείπονται παραπάνω από 25 ημέρες με χιονοκάλυψη που αντιστοιχούν σε ποσοστά -30% έως -40%, ενώ όσο πιο χαμηλό είναι το υψόμετρο, τόσο πιο μεγάλο είναι το ποσοστό μείωσης, αγγίζοντας τιμές έως και 70% στην περιοχή του Έβρου και των ημιορεινών τμημάτων της κεντρικής, βόρειας Ελλάδας, καθώς και τμημάτων της Πελοποννήσου και των ορεινών όγκων της Κρήτης (Σχήμα 25γ,δ).



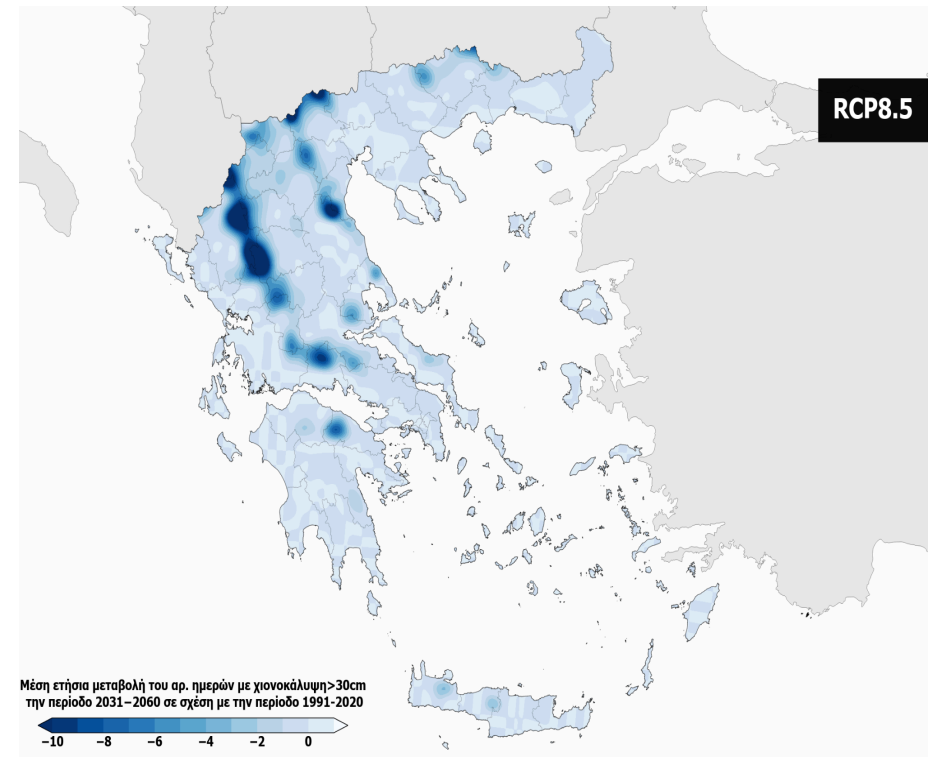
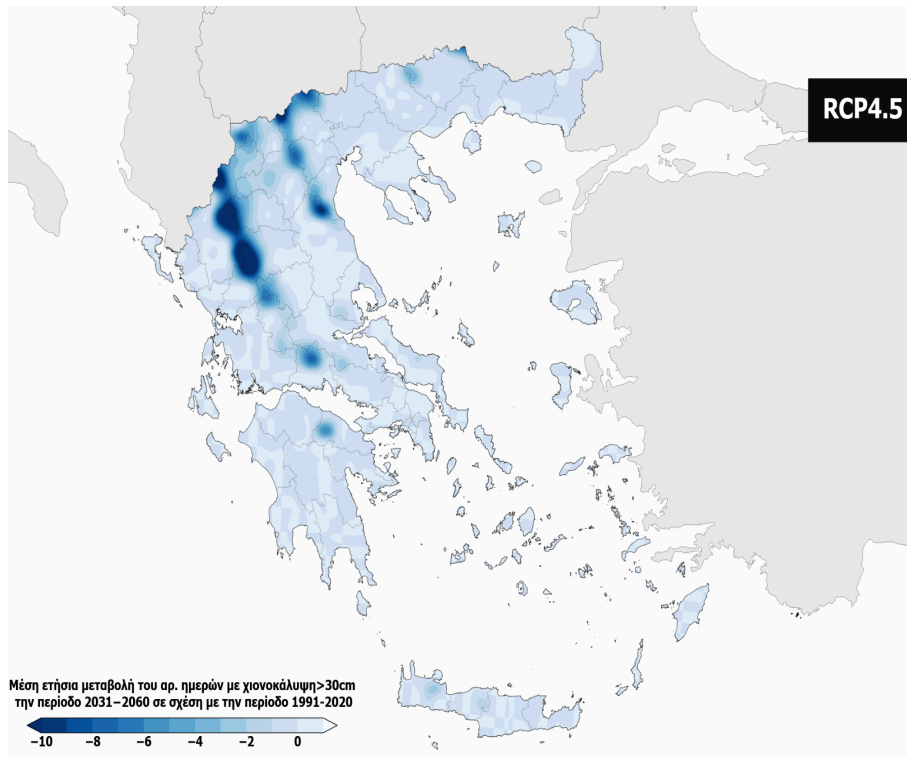


Σχήμα 25. Χάρτες αποχών του μέσου ετήσιου αριθμού ημερών με χιονοκάλυψη για την περίοδο Σεπτέμβριος - Μάιος της 30ετίας 2031-2060 σε σύγκριση με την κλιματική τιμή της περιόδου 1991-2020, σύμφωνα με τον μέσο όρο των 8 κλιματικών μοντέλων που επιλέχθηκαν για τα 2 πιθανά κλιματικά σενάρια RCP 4.5 (α,β) και RCP 8.5 (γ,δ).

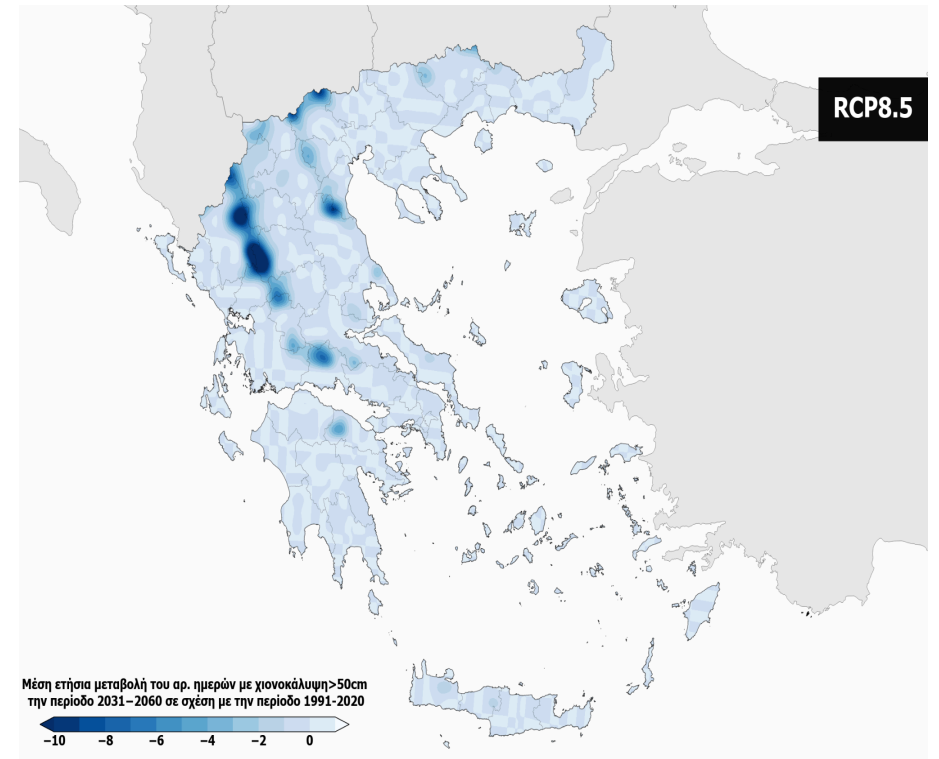
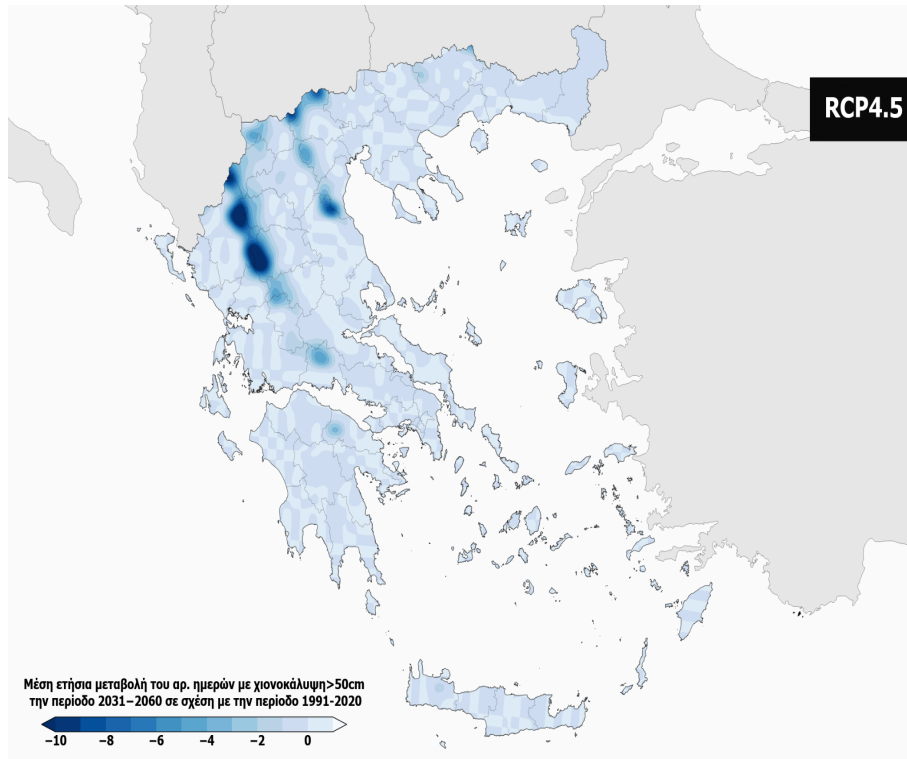
Στη συνέχεια, η προσέγγιση των μελλοντικών συνθηκών χιονιού επικεντρώθηκε στις ορεινές περιοχές εξετάζοντας περαιτέρω τα χιονοδρομικά κέντρα. Υπολογίστηκαν αρχικά, οι απώλειες ημερών με χιονοκάλυψη για συγκεκριμένα ύψη χιονιού (χιονομετρικούς δείκτες) που προβλέπονται σε κάθε σενάριο (RCP 4.5 και RCP 8.5) και αποτυπώθηκαν σε χάρτες για την καλύτερη μελέτη της χωρικής κατανομής τους. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στο Σχήμα 26. Στο σενάριο RCP 4.5, ο υπολογισμός του μέσου ετήσιου αριθμού ημερών με χιονοκάλυψη της περιόδου 2031-2060 υποδεικνύει μια διαφαινόμενη μείωση έως και 20 ημέρες σε σχέση με την περίοδο 1991-2020 όσον αφορά τις ημέρες με βάθος χιονιού με > 5 εκατοστά, με τις πιο αρνητικές αποκλίσεις να εντοπίζονται στις ορεινές περιοχές της βόρειας κυρίως χώρας. Μεγάλη μείωση προβλέπεται και για τις ημέρες με χιονόστρωση >30 και >50 εκατοστών αντίστοιχα, με τις περιοχές της Πίνδου με μεγάλα υψόμετρα να υφίστανται μια απώλεια μεγαλύτερη των 10 ημερών σε σχέση με την κλιματική τιμή της 30ετίας 1991-2020. Παράλληλα, στο σενάριο εκπομπών CO₂ για RCP 8.5, διαφαίνεται μια πιο αισθητή μείωση των ημερών με χιονοκάλυψη σε όλη την έκταση της χώρας με έμφαση στα βόρεια και βορειοδυτικά τμήματα. Οι πιο ευάλωτες περιοχές φαίνεται να είναι και πάλι οι ορεινές που γενικά δέχονται τις μεγαλύτερες ποσότητες χιονιού διαχρονικά. Πιο αναλυτικά, όσον αφορά τον αριθμό ημερών με χιονοκάλυψη >5 εκ, στα ορεινά τμήματα της βόρειας και δυτικής χώρας προβλέπεται μια απώλεια μεγαλύτερη των 25 ημερών κατά μέσο όρο την περίοδο 2031-2060 σε σύγκριση με το παρόν κλίμα. Στην κεντρική χώρα, τα ανατολικά ηπειρωτικά φαίνεται να υφίστανται μια μείωση 10-20 ημερών, ενώ τα δυτικότερα τμήματα φαίνεται να υπολείπονται ακόμα περισσότερων ημερών αγγίζοντας έως και τις 25 ημέρες ανα έτος στα ορεινότερα τμήματα. Τέλος, στη νότια χώρα φαίνεται μια μείωση 5 έως 10 ημερών χιονοκάλυψης, με τα μεγάλα υψόμετρα να χάνουν ακόμα και πάνω από 10 ημέρες με χιονοκάλυψη >5 εκατοστά. Τέλος, σχετικά με τις ημέρες με χιονοκάλυψη >30 εκατοστών και >50 εκατοστών, η μεγαλύτερη μείωση ακολουθεί το ίδιο μοτίβο, περιορισμένη στα μεγαλύτερα υψόμετρα όπου σημειώνονται πιο συχνά τέτοιες ποσότητες χιονιού. Σημαντικό είναι να αναφερθεί, ότι την μεγαλύτερη απώλεια ημερών με χιονοκάλυψη φαίνεται να υφίστανται πάλι τα μεγαλύτερα υψόμετρα του βόρειου τμήματος της Πίνδου καθώς και ο ορεινός όγκος του Ολύμπου.



Nb of Days
with snow
depth>30 cm



Nb of Days
with snow
depth>50 cm



Σχήμα 26. Χάρτες αποχών μέσου ετήσιου αριθμού ημερών με χιονοκάλυψη κατά την περίοδο 2031-2060 σε σύγκριση με την περίοδο 1991-2020 για 3 διαφορετικά κατώφλια ύψους χιονιού.

3.2.3 Χιονοδρομικά κέντρα

Αυτή η ραγδαία μείωση της χιονοκάλυψης στους ορεινούς όγκους της Ελλάδας αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά την λειτουργία των χιονοδρομικών και την βιωσιμότητα των χειμερινών προορισμών. Για τον προσδιορισμό της επικείμενης αλλαγής, η μελέτη των κλιματικών προσομοιώσεων επικεντρώθηκε περεταίρω στα χιονοδρομικά κέντρα της χώρας, και εξήχθησε ο αριθμός ημερών χιονοκάλυψης (ημέρες με ύψος χιονιού μεγαλύτερο από 5 εκατοστά) που αναμένεται να χάσουν υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής. Η επιλογή του κατωφλίου των 5 εκατοστών για την ανάλυση των δεδομένων για τα χιονοδρομικά έγινε για να αποφευχθούν πιθανές υπερεκτιμήσεις του αριθμού ημερών με μικρότερο ύψος χιονιού από τα μοντέλα. Τα ακριβή νούμερα εμφανίζονται στον Πίνακα 4.

Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν την πιο έντονη μείωση της χιονοκάλυψης στα χιονοδρομικά της βόρειας Ελλάδας σε σύγκριση με τα χιονοδρομικά της νότιας χώρας που βρίσκονται σε αντίστοιχα υψόμετρα, το οποίο συμφωνεί με το μοτίβο αρνητικής τάσης της περιόδου 1991-2020 που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.1.3. Πιο συγκεκριμένα, τα χιονοδρομικά Καϊμακτσαλάν, Σελίου και Βασιλίτσας φαίνεται να είναι πιο ευάλωτα, παρουσιάζοντας μια μείωση 19 ημερών με το σενάριο RCP 4.5 και 24 ημερών με το σενάριο RCP 8.5. Παράλληλα, χιονοδρομικά της κεντρικής χώρας φαίνεται να υπόκεινται μια ελάττωση που ανέρχεται στις 16 και 21 ημέρες με τα σενάρια RCP 4.5 και 8.5 αντίστοιχα. Εξάιρεση αποτελεί το χιονοδρομικό κέντρο του Παρνασσού, το οποίο παρουσιάζει την μικρότερη συρρίκνωση της περιόδου χιονοκάλυψης σε σχέση με τα υπόλοιπα χιονοδρομικά, εμφανίζοντας μια απώλεια 13 ημερών με το σενάριο RCP 4.5 και 17 ημερών με το σενάριο RCP 8.5.

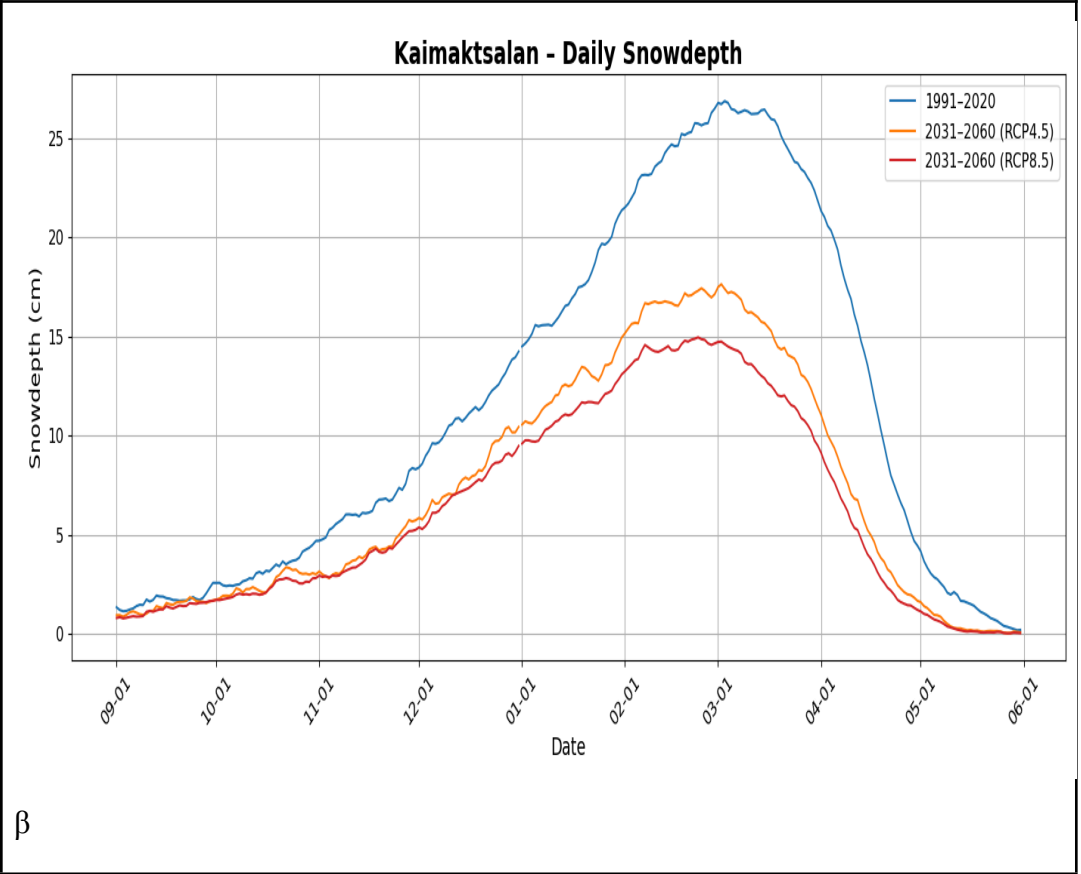
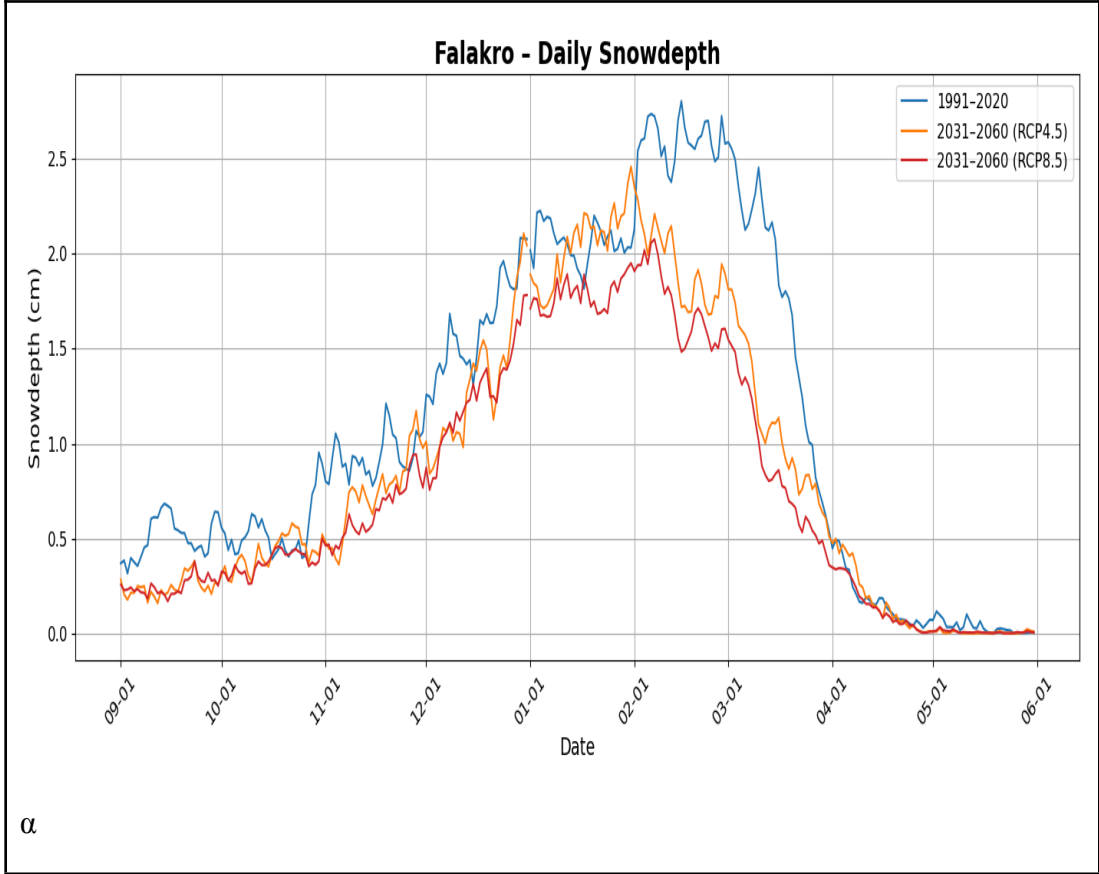
Πίνακας 4. Μέση ετήσια αποχή αριθμού ημερών με χιονοκάλυψη (βάθος χιονιού >5 εκατοστά) σε επιλεγμένα χιονοδρομικά της χώρας κατά την περίοδο 2031-2060 σε σύγκριση με την κλιματική τιμή της περιόδου 1991-2020.

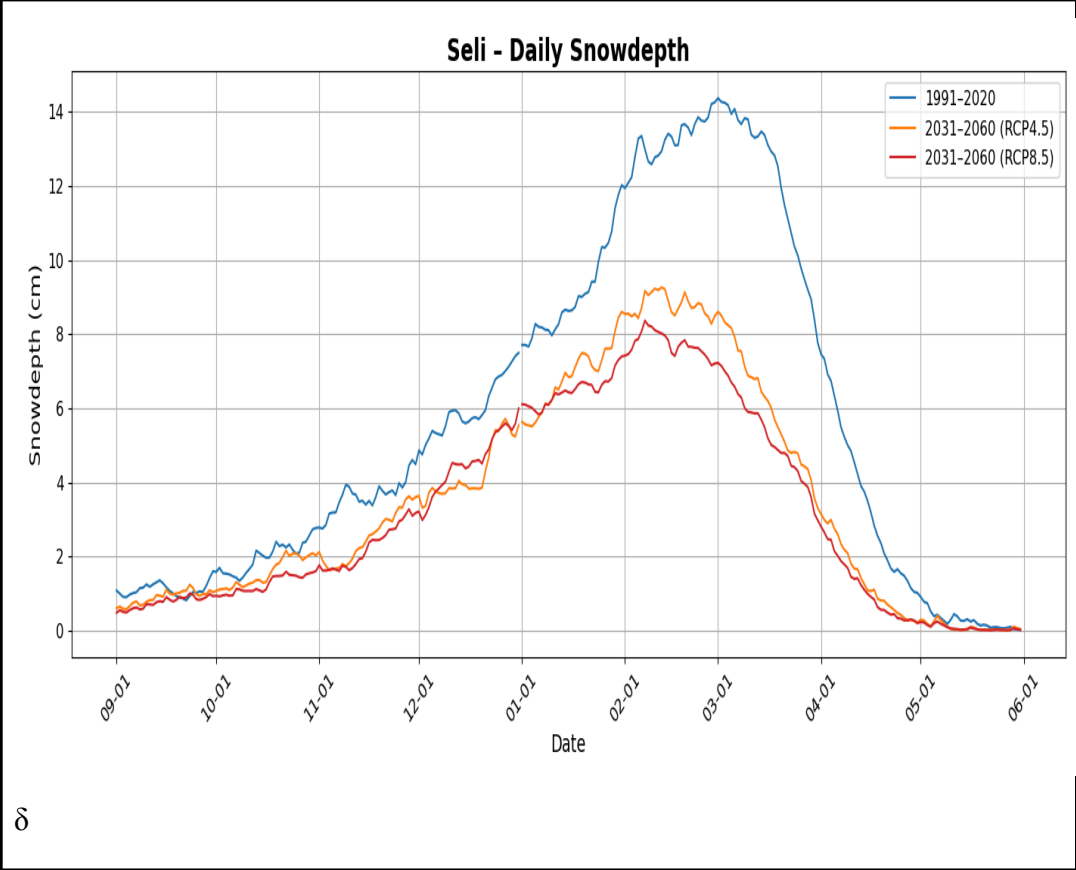
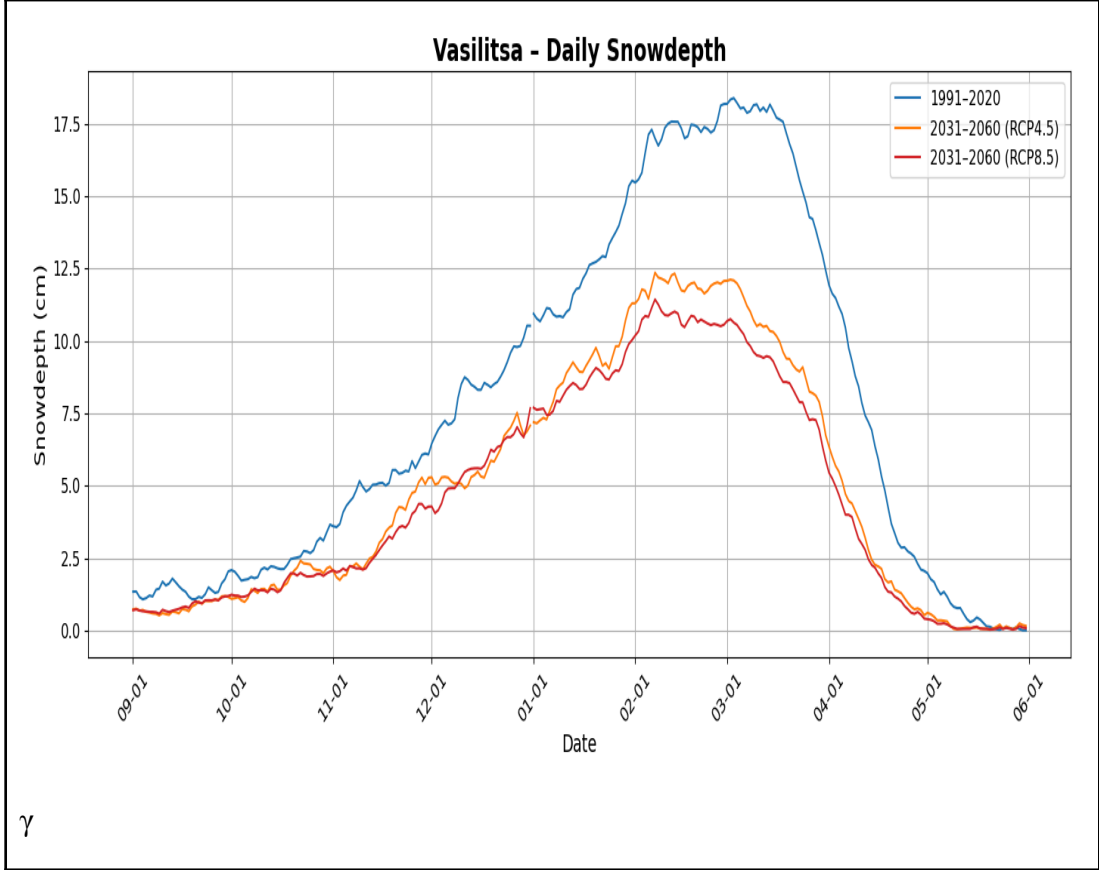
	Χιονοδρομικό κέντρο	Scenario 1 (RCP - 4.5)	Scenario 2 (RCP - 8.5)
Βόρεια Ελλάδα	Καϊμακτσαλάν	-19	-24

Βόρεια Ελλάδα	Φαλακρό	-13	-19
Βόρεια Ελλάδα	3-5 Πηγάδια	-17	-22
Βόρεια Ελλάδα	Βασιλίτσα	-19	-24
Βόρεια Ελλάδα	Σέλι	-19	-24
Βόρεια Ελλάδα	Περτούλι	-16	-21
Κεντρική Ελλάδα	Καρπενήσι	-16	-21
Κεντρική Ελλάδα	Παρνασσός	-13	-17
Νότια Ελλάδα	Καλάβρυτα	-17	-22

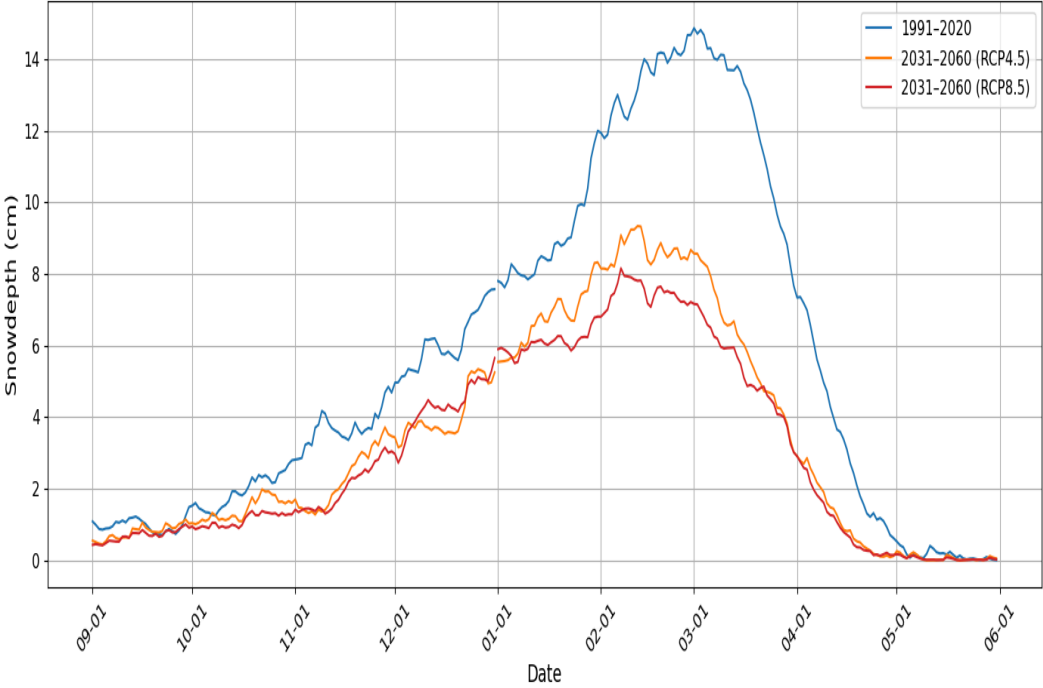
Τέλος, για την πιο άμεση οπτικοποίηση της μεταβολής της χιονοκάλυψης στα χιονοδρομικά, δημιουργήθηκαν γραφήματα αντίστοιχα με αυτά που παρατέθηκαν στο Σχήμα 21 και παρατίθενται στο σχήμα 27. Τα συγκεκριμένα απεικονίζουν το μέσο ημερήσιο ύψος χιονιού για την περίοδο 1991-2020 (μπλέ γραμμή) και για τα 2 πιθανά σενάρια εκπομπών για την περίοδο 2031-2060 (πορτοκαλί γραμμή για το σενάριο RCP - 4.5 και κόκκινη γραμμή για το σενάριο RCP - 8.5). Οι μικρές τιμές του ύψους χιονιού σε ορισμένα χιονοδρομικά πιθανώς οφείλονται στην χαμηλή ανάλυση των μοντέλων.

Τα αποτελέσματα δείχνουν την εμφανή τάση για περαιτέρω σημαντική μείωση της διάρκειας της χιονοκάλυψης σε όλα τα χιονοδρομικά και στα δύο σενάρια, με τις πορτοκαλί και κόκκινες γραμμές να βρίσκονται διαρκώς κάτω από την μπλέ σε όλα τα διαγράμματα. Μεμονωμένες εξαιρέσεις αποτελούν ελάχιστες ημέρες της περιόδου Σεπτέμβριος - Μάιος όπου η πορτοκαλί γραμμή (σενάριο RCP 4.5) υπερβαίνει την κλιματική τιμή στα χιονοδρομικά του Περτουλίου, Παρνασσού και Καρπενησίου, τα οποία απαντώνται στην κεντρική και Νότια Ελλάδα. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των διαγραμμάτων είναι η καθυστερημένη έναρξη της περιόδου χιονοκάλυψης και η πρόωρη λήξη.



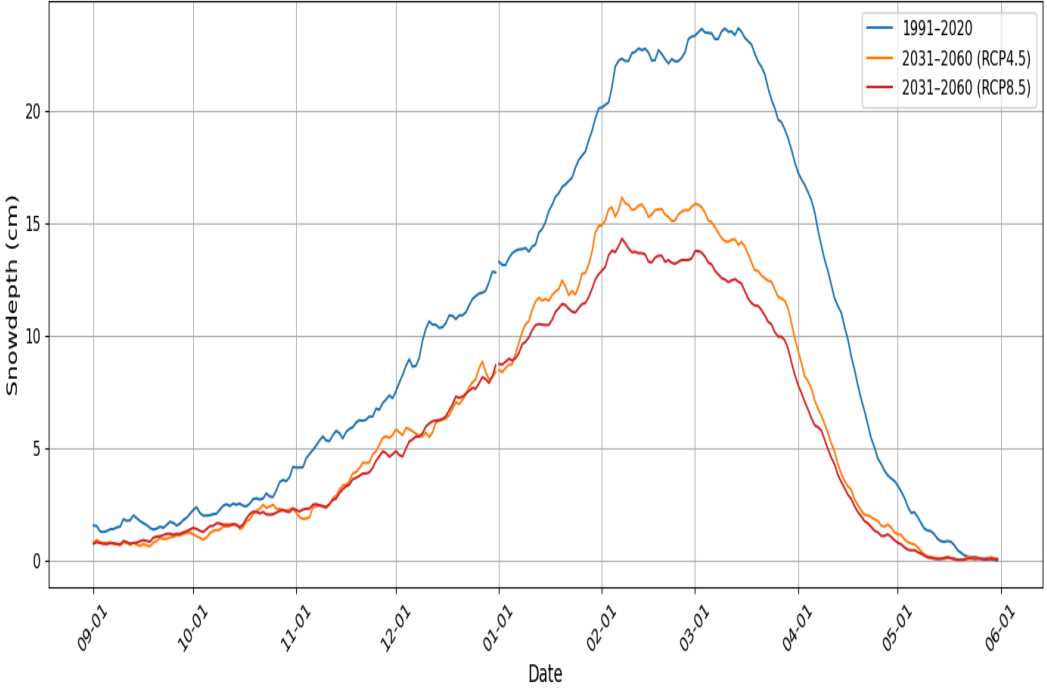


3-5 Pigadia - Daily Snowdepth

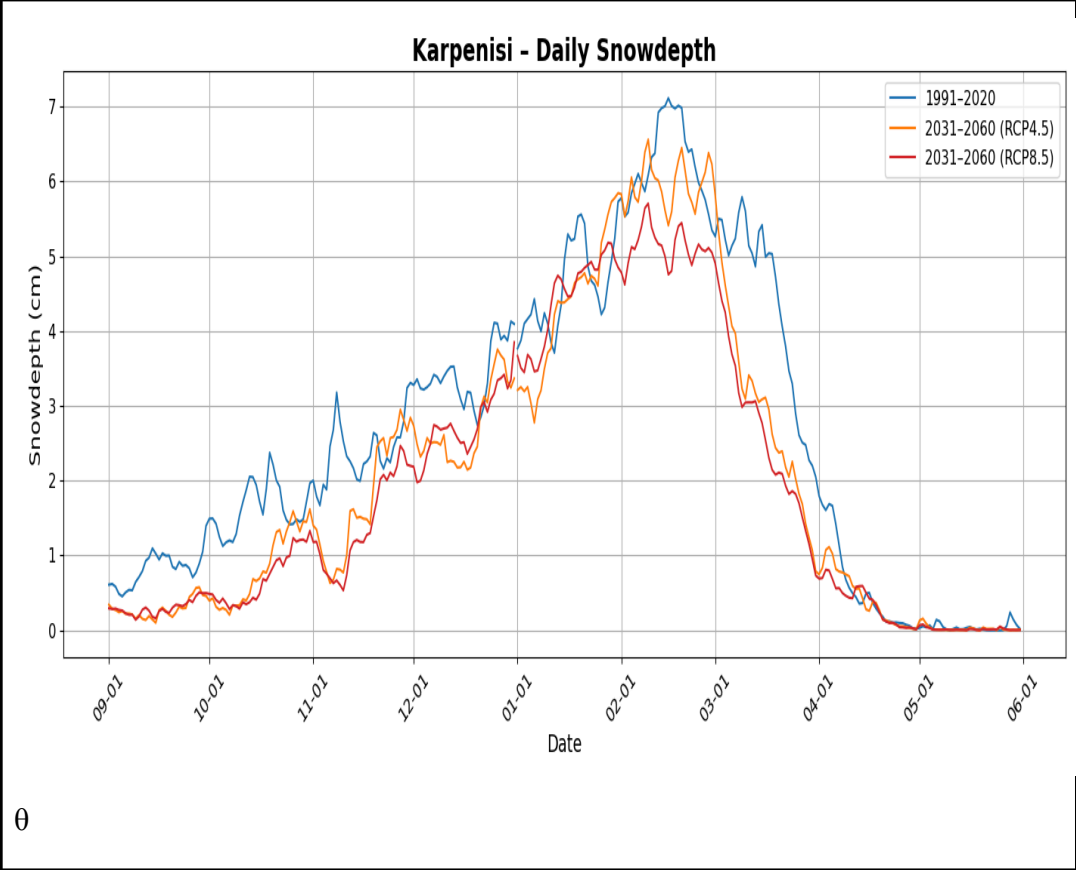
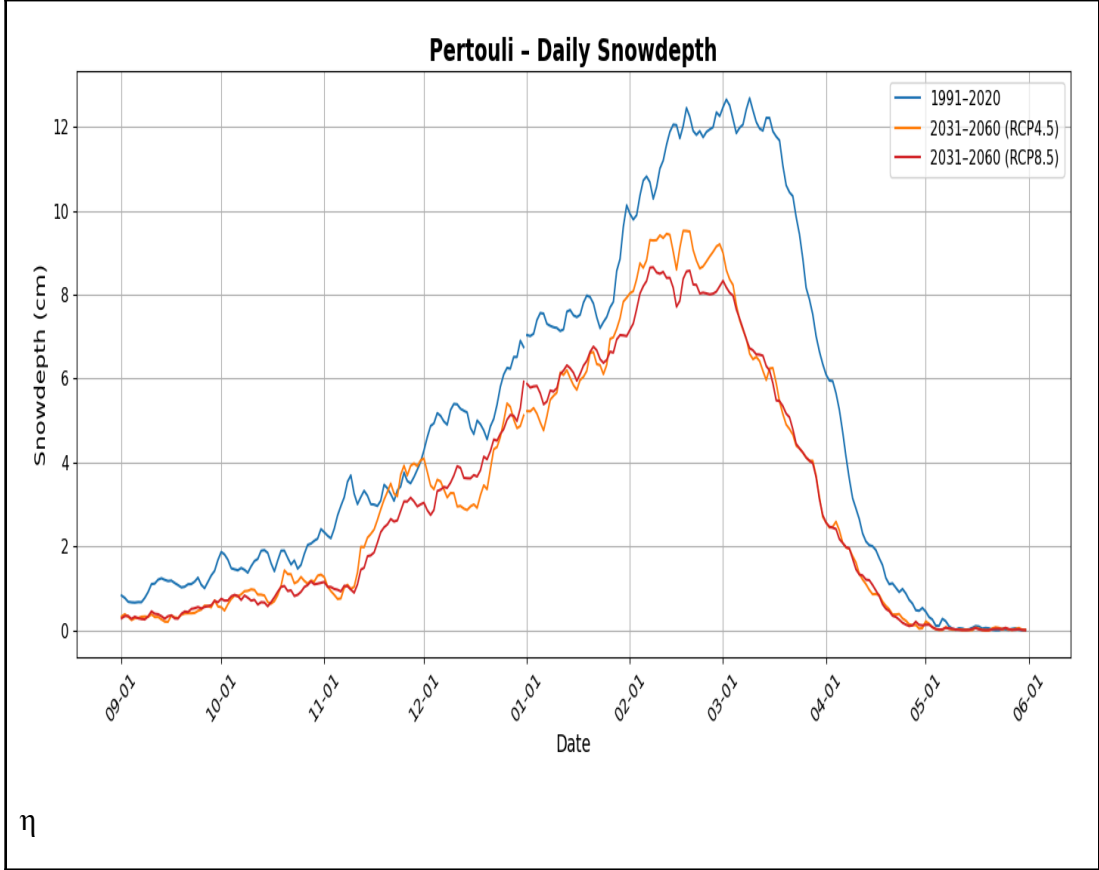


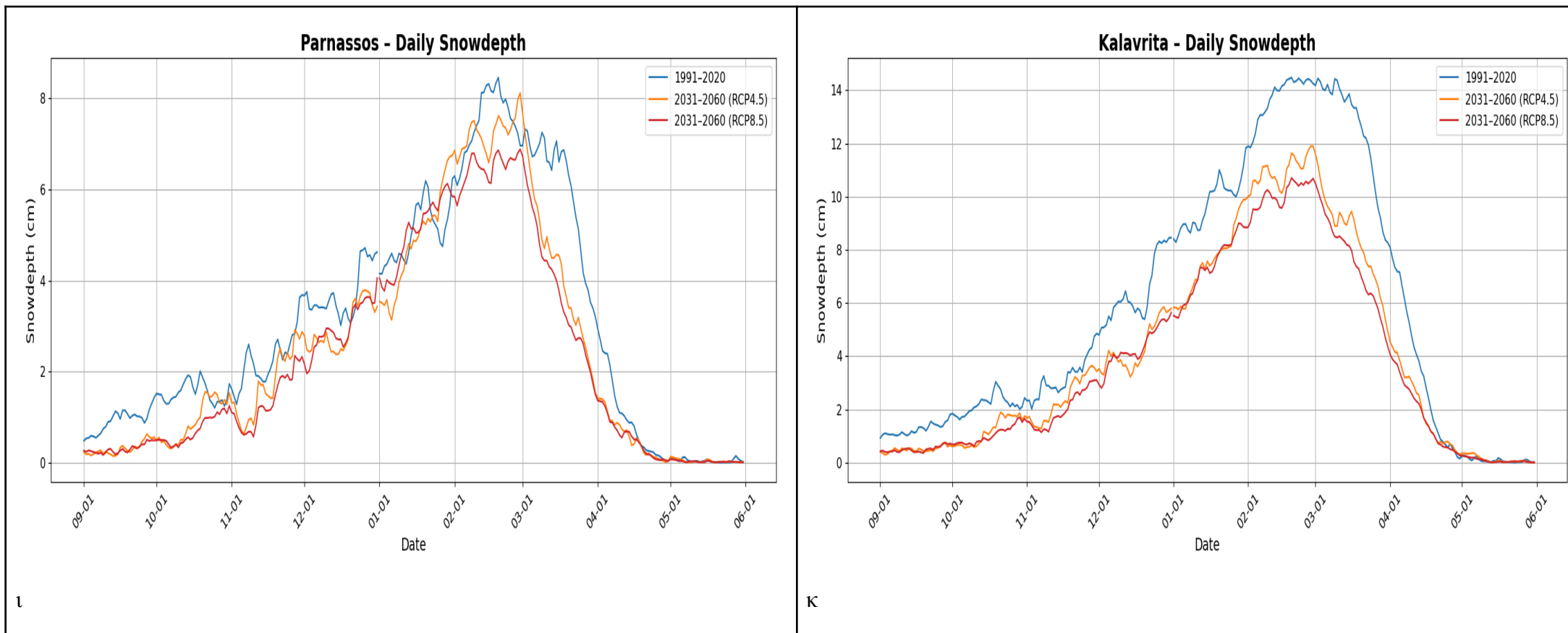
8

Anilio-Metsovo - Daily Snowdepth



9





Σχήμα 27. Μέση ενδο-ετήσια διακύμανση ύψους χιονιού κατά τις τριανταετίες 1991-2020, 2031-2060, σύμφωνα με τα σενάρια εκπομπής CO_2 RCP 4.5 και RCP 8.5, στα χιονοδρομικά: (α) Φαλακρό, (β) Καιμακτσαλάν, (γ) Βασιλίτσα, (δ) Σέλι, (ε) 3-5 Πηγάδια, (ζ) Ανήλιο, (η) Περτούλι, (θ) Καρπενήσι, (ι) Παρνασσός και (κ) Καλάβρυτα.

4. ΣΥΝΟΨΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Η παρούσα εργασία, εστιάζοντας στην ευρύτερη περιοχή της Ελλάδας, πραγματεύεται την κλιματολογία των συνθηκών χιονοκάλυψης κατά την περίοδο 1991-2020, ενώ παράλληλα, μελετάει τις μελλοντικές εκτιμήσεις των αντίστοιχων συνθηκών χιονιού για την χρονική περίοδο 2031-2060. Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο σκέλος της έρευνας, υπολογίστηκε το μέσο ύψος χιονιού για την περίοδο Δεκεμβρίου - Μαρτίου της περιόδου 1991-2020 για τον προσδιορισμό της κλιματικής τιμής και στην συνέχεια βρέθηκε η αντίστοιχη μέση τιμή για κάθε δεκαετία και προσδιορίστηκε η εκάστοτε αποχή από την κλιματική τιμή. Επίσης, υπολογίστηκε η αντίστοιχη απόκλιση από την κλιματική τιμή για κάθε έτος ξεχωριστά. Τέλος, προσδιορίστηκαν η τάση του μέσου ύψους χιονιού διαχρονικά, για κάθε μήνα ξεχωριστά καθώς και για όλη την περίοδο που ερευνήθηκε, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στα σημεία όπου αυτή η τάση φαίνεται να είναι στατιστικά σημαντική. Οι αντίστοιχοι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν και για τις συνθήκες χιονοκάλυψης, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στη διαχρονική μεταβολή της έκτασης και της διάρκειας αυτής. Από το σύνολο της χώρας, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στα χιονοδρομικά κέντρα που αποτελούν βασικό πυλώνα της οικονομίας πολλών ορεινών περιοχών, που επενδύουν στον χειμερινό τουρισμό. Το δεύτερο σκέλος της ανάλυσης εστιάζει στην εκτίμηση των μελλοντικών συνθηκών χιονιού από 8 κλιματικές προσομοιώσεις, για 2 διαφορετικά σενάρια εκπομπής CO₂. Τα σενάρια που μελετήθηκαν αφορούν τις εκπομπές RCP 4.5 και RCP 8.5 και για κάθε ένα από τα 2 σενάρια, υπολογίστηκε η μέση τιμή από όλα τα μοντέλα για κάθε ημέρα των 2 περιόδων (1991-2020, 2031-2060). Έχοντας πλέον την μέση τιμή από όλες τις προσομοιώσεις για κάθε ημέρα των 2 περιόδων, ορίστηκε η κλιματική τιμή του μέσου ύψους χιονιού για την περίοδο Δεκέμβριος - Μάρτιος και ο μέσος ετήσιος αριθμός ημερών με χιονοκάλυψη (ύψος χιονιού >0 cm) από τον Σεπτέμβριο έως τον Μάιο για την περίοδο 1991-2020. Στη συνέχεια, έγινε ο υπολογισμός των αντίστοιχων τιμών της περιόδου 2031-2060 και προσδιορίστηκαν οι αποχές τους από την κλιματική τιμή της περιόδου 1991-2020. Όπως και στην μελέτη του παρόντος κλίματος, στα χιονοδρομικά της Ελλάδας δόθηκε δέουσα προσοχή και προσδιορίστηκαν οι διαφορές που αναμένεται να έχουν οι 2 30-ετίες βασιζόμενοι στις συγκεκριμένες κλιματικές προβλέψεις.

Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν συνοψίζονται ως εξής:

- Σημαντική μείωση του μέσου ύψους χιονιού κατά την περίοδο Δεκεμβρίου – Μαρτίου, ιδίως κατά τη δεκαετία 2011–2020.
- Συγκέντρωση πολλών ετών με εκτεταμένες αρνητικές αποκλίσεις όσον αφορά το μέσο βάθος χιονιού κατά την τελευταία δεκαετία
- Στατιστικά σημαντική αρνητική τάση, διαχρονικώς, για το μέσο ύψος χιονιού σε ημιορεινές και ορεινές περιοχές της κεντρικής και βόρειας Ελλάδας και κυρίως της δυτικής Μακεδονίας
- Μεγαλύτερη αρνητική τάση καταγράφεται κατά τον μήνα Δεκέμβριο
- Αξιοσημείωτη μείωση τόσο της έκτασης όσο και της διάρκειας της χιονοκάλυψης στην περίοδο Σεπτεμβρίου – Μαΐου, με ιδιαίτερη έμφαση στον μήνα Δεκέμβριο, κατά τη δεκαετία 2011–2020.
- Στατιστικά σημαντική αρνητική τάση έκτασης και διάρκειας χιονοκάλυψης με τις μεγαλύτερες αρνητικές τιμές να εμφανίζονται στην δυτική Μακεδονία και στις ορεινές και ημιορεινές περιοχές της κεντρικής χώρας
- Συρρίκνωση της διάρκειας περιόδου με χιονοκάλυψη στα χιονοδρομικά της χώρας
- Εκτιμώμενη περαιτέρω μείωση του μέσου ύψους χιονιού στο μέλλον
- Απώλεια έως και 50% του αριθμού ημερών με χιονοκάλυψη έως το 2060.

Η συγκεκριμένη έρευνα εξετάζει στη μεταβλητότητα των κλιματικών χαρακτηριστικών χιονοκάλυψης κατά την παρούσα χρονική περίοδο αλλά και τις σχετικές εκτιμήσεις για τις μελλοντικές δεκαετίες. Καθώς οι αλλαγές αυτές βρίσκονται εντός των πλαισίων της κλιματικής αλλαγής, παρουσιάζονται έντονες αλλά και απρόβλεπτες και συνεπώς οι προοπτικές που παρουσιάζει η παρούσα εργασία είναι αρκετές. Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, η ύπαρξη ή όχι χιονιού στο έδαφος παίζει καταλυτικό ρόλο στην βιωσιμότητα και την ομαλή λειτουργία πολλών οικοσυστημάτων, αποτελεί ίσως την βασικότερη πηγή τροφοδοσίας πόσιμου νερού για πολλές περιοχές του πλανήτη, ενώ παράλληλα συνδέεται άμεσα με την οικονομία των περιοχών που στηρίζονται στον χειμερινό τουρισμό. Επομένως, η επιρροή του χιονιού στην ανθρώπινη καθημερινότητα

είναι τόσο άμεση όσο και έμμεση. Η επέκταση λοιπόν εργασιών όπως αυτή θα συνδράμει στην καλύτερη κατανόηση των κλιματικών μηχανισμών που οδηγούν σε αυτές τις αλλαγές και θα συντελέσει στην εύρεση μεθόδων αντιμετώπισης των πιθανών συνεπειών που θα προκύψουν. Η μελέτη των ατμοσφαιρικών αλλαγών και της επιρροής τους στις συνθήκες επιφανείας της γής θα προσδώσει μια ευρύτερη εικόνα της αλληλεπίδρασης που υπάρχει μεταξύ της ανθρώπινης δραστηριότητας, των ατμοσφαιρικών μεταβλητών και των επιφανειακών συνθηκών. Ο προσδιορισμός της έντασης αυτής της αλληλεπίδρασης καθώς και η επιδίωξη της βαθύτερης κατανόησης της θα οδηγήσουν στην καλύτερη και αποτελεσματικότερη διαχείριση της κλιματικής αλλαγής αποσκοπώντας στην διατήρηση της βιωσιμότητας τόσο των φυσικών οικοσυστημάτων όσο και των τοπικών οικονομιών.

Βιβλιογραφική Λίστα Αναφορών

1. Anagnostopoulou, C., Tolika, K., Lazoglou, G., & Maheras, P. (2017). The exceptionally cold January of 2017 over the Balkan Peninsula: A climatological and synoptic analysis. *Atmosphere*, 8(12), 252. <https://doi.org/10.3390/atmos8120252>
2. Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438, 303–309. <https://doi.org/10.1038/nature04141>
3. Beniston, M. (1997). Variations of snow depth and duration in the Swiss Alps over the last 50 years: Links to changes in large-scale climatic forcings. *Climatic Change*, 36, 281–300. <https://doi.org/10.1023/a:1005310214361>
4. Beniston, M., Farinotti, D., Stoffel, M., Andreassen, L. M., Coppola, E., Eckert, N., ... & Vincent, C. (2018). The European mountain cryosphere: A review of its current state, trends, and future challenges. *The Cryosphere*, 12, 759–794.
5. Brown, R. D. (2020). Northern Hemisphere snow cover variability and change, 1915–1997. *Journal of Climate*, 13, 2339–2355. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<2339:NHSCVA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<2339:NHSCVA>2.0.CO;2)
6. Danielson, J.J. & Gesch, D.B. (2011) Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010): U.S. Geological Survey Open-File Report 2011–1073. 26 p., <https://doi.org/10.3133/ofr20111073>
7. de Rosnay, P., Balsamo, G., Albergel, C., Muñoz-Sabater, J., & Isaksen, L. (2014). Initialisation of land surface variables for numerical weather prediction. *Surveys in Geophysics*, 35, 607–621.
8. Demiroglu, O. C., Kučerová, J., & Ozcelebi, O. (2015). Snow reliability and climate elasticity: Case of a Slovak ski resort. *Tourism Review*, 70(1), 1–12. <https://doi.org/10.1108/TR-01-2014-0003>
9. Essential Climate Variables. (2024). World Meteorological Organization. <https://gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables/table>(accessed on 5 October 2024).
10. Fayad, A., Gascoin, S., Faour, G., López-Moreno, J. I., Drapeau, L., Page, M. L., & Escadafal, R. (2017). Snow hydrology in Mediterranean mountain regions: A review. *Journal of Hydrology*, 551, 374–396.
11. Feidas, H., Nouloupoulou, C., Makrogiannis, T., & Bora-Senta, E. (2007). Trend analysis of precipitation time series in Greece and their relationship with circulation using surface and satellite data: 1955–2001. *Theoretical and Applied Climatology*, 87, 155–177.
12. Flanner, M. G., Shell, K. M., Barlage, M., Perovich, D. K., & Tschudi, M. A. (2011). Radiative forcing and albedo feedback from the Northern Hemisphere cryosphere between 1979 and 2008. *Nature Geoscience*, 4, 151–155. <https://doi.org/10.1038/ngeo1062>
13. Giorgi, F., & Gutowski, W. J. (2015). Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative. *Annual Review of Environment and Resources*, 40, 467–490.

- <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021217>
14. Gottlieb, A. R., & Mankin, J. S. (2024). Evidence of human influence on Northern Hemisphere snow loss. *Nature*, 625, 293–300.
 15. Henderson, G. R., Leathers, A. M., & Robinson, D. A. (2018). Northern Hemisphere snow cover variability and change. *Journal of Climate*, 31, 6517–6531. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0786.1>
 16. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate change 2014: Synthesis report*. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
 17. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Sixth Assessment Report: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> (accessed on 10 October 2024)
 18. Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., ... & Wibig, J. (2014). EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14, 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
 19. Kömüscü, A. Ü., & Oğuz, K. (2021). Analysis of cold anomalies observed over Turkey during the 2018/2019 winter in relation to polar vortex and other atmospheric patterns. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 133, 1327–1354. <https://doi.org/10.1007/s00703-021-00806-0>
 20. Kotlarski, S.; Keuler, K.; Christensen, O.B.; Colette, A.; Déqué, M.; Gobiet, A.; Goergen, K.; Jacob, D.; Lüthi, D.; van Meijgaard, E.; et al. (2014). Regional climate modeling on European scales: A joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geoscientific Model Development*, 7, 1297–1333. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1297-2014>
 21. Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 259–263.
 22. Masloumidis, I., Dafis, S., Kyros, G., & Lagouvardos, K. (2023). Snow depth trends of European ski resorts. *Environmental Sciences Proceedings*, 26, 16. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2023026016>
 23. Mazari, N., Tekeli, A. E., Xie, H., Sharif, H. O., & El Hassan, A. A. (2013). Assessment of ice mapping system and MODIS snow cover maps over Colorado Plateau. *Journal of Applied Remote Sensing*, 7, 073540.
 24. Monteiro, D., & Morin, S. (2023). Multi-decadal past winter temperature, precipitation and snow cover information over the European Alps using multiple datasets. *EGUsphere*, 17, 3617–3660. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-166>
 25. Moreno-Gené, J., Sánchez-Pulido, L., Cristobal-Fransi, E., & Daries, N. (2018). The economic sustainability of snow tourism: The case of ski resorts in Austria, France, and Italy. *Sustainability*, 10(9), 3012. <https://doi.org/10.3390/su10093012>
 26. Morin, S., Samacoïts, R., François, H., Carmagnola, C. M., Abegg, B., Demiroglu, O. C., ... & Cauchy, A. (2021). Pan-European meteorological and snow indicators of climate change impact on ski tourism. *Climate Services*, 22, 100215. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2021.100215>
 27. Notarnicola, C. (2022). Overall negative trends for snow cover extent and duration in global mountain regions over 1982–2020. *Scientific Reports*, 12, 13731.

<https://doi.org/10.1038/s41598-022-16743-w>

28. Ogrin, M., Ogrin, D., Rodman, N., Močnik, M., Vengar, R., Smolej, A., & Bunčič, G. (2011). Climate change and the future of winter tourism in Slovenia. *Hrvatski Geografski Glasnik*, 73, 215–228. <https://doi.org/10.21861/hgg.2011.73.01.14>
29. Pielke Jr., R., Burgess, M. G., & Ritchie, J. (2022). Plausible 2005–2050 emissions scenarios project between 2 and 3 degrees C of warming by 2100. *Environmental Research Letters*, 17(2), 024027. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4ebf>
30. Pulliainen, J., Aaltonen, A. K., Rautiainen, M., Hallikainen, M. T., & Salberg, R. (2017). The role of snow in the global carbon cycle. *Nature Climate Change*, 7, 833–839. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0029-5>
31. Pulliainen, J., Luojus, K., Derksen, C., Mudryk, L., Lemmetyinen, J., Salminen, M., ... & Yang, H. (2020). Patterns and trends of Northern Hemisphere snow mass from 1980 to 2018. *Nature*, 581, 294–298. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2258-0>
32. Ridal, M., Bazile, E., Le Moigne, P., Randriamampianina, R., Schimanke, S., Andrae, U., Berggren, L., Brousseau, P., Dahlgren, P., Edvinsson, L., El-Said, A., Glinton, M., Hagelin, S., Hopsch, S., Isaksson, L., Medeiros, P., Olsson, E., Undén, P., & Wang, Z. Q. (2024). CERRA, the Copernicus European Regional Reanalysis system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150, 3385–3411. <https://doi.org/10.1002/qj.4764>
33. Scott, D., McBoyle, G., Minogue, A., & Mills, B. (2006). Climate change and the sustainability of ski-based tourism in eastern North America: A reassessment. *Journal of Sustainable Tourism*, 14(4), 376–398. <https://doi.org/10.2167/jost550.0>
34. Skimap. (n.d.). Retrieved from <https://skimap.org/> (accessed on 10 November 2024)
35. Sönmez, I., Tekeli, A. E., & Erdi, E. (2014). Snow cover trend analysis using interactive multisensor snow and ice mapping system data over Turkey. *International Journal of Climatology*, 34, 2349–2361. <https://doi.org/10.1002/joc.3843>
36. Steiger, R., Scott, D., Abegg, B., Pons, M., & Aall, C. (2017). A critical review of climate change risk for ski tourism. *Current Issues in Tourism*, 22, 1343–1379. <https://doi.org/10.1080/13683500.2017.1410110>
37. Sturm, M., Goldstein, M. A., & Parr, C. (2017). Water and life from snow: A trillion dollar science question. *Water Resources Research*, 53, 3534–3544.
38. Tran, V. N., Zhou, W., Kim, T., Mazepa, V., Valdayskikh, V., & Ivanov, V. Y. (2024). Daily station-level records of air temperature, snow depth, and ground temperature in the Northern Hemisphere. *Scientific Data*, 11, 645.
39. Tringa, E., Tolika, K., Anagnostopoulou, C., & Kostopoulou, E. (2022). A climatological and synoptic analysis of winter cold spells over the Balkan Peninsula. *Atmosphere*, 13, 1851. <https://doi.org/10.3390/atmos13111851>
40. Tsilogianni, D., Cartalis, C., & Philippopoulos, K. (2023). Climate change impact assessment on ski tourism in Greece: Case study of the Parnassos Ski Resort. *Climate*, 11(7), 140.

<https://doi.org/10.3390/cli11070140>

41. Tziallas, H. (2015). Mountainous landscapes and climate variability in Greece: Impacts on tourism and development. *Regional Environmental Change*, 15, 743–754.
42. U.S. National Ice Center. (2008). IMS daily Northern Hemisphere snow and ice analysis at 1 km, 4 km, and 24 km resolutions (G02156, Version 1). National Snow and Ice Data Center. <https://doi.org/10.7265/N52R3PMC>
43. van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... & Rose, S. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109, 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
44. Verrelle, A.; Glinton, M.; Bazile, E.; Le Moigne, P.; Randriamampianina, R.; Ridal, M.; Berggren, L.; Undén, P.; Schimanke, S.; Mladek, R.; et al. . (2022). CERRA-Land sub-daily regional reanalysis data for Europe from 1984 to present. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store* (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.a7f3cd0b>.(accessed on 27 November 2024).