



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΥΔΡΟΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ
ΠΡΟΓΝΩΣΕΩΝ ΕΠΟΧΙΚΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ

της

Φραγκή Ασημίνας

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

Υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή Αριστείδη Κουτρούλη

Τριμελής Επιτροπή:

Αριστείδης Κουτρούλης, Αναπληρωτής Καθηγητής, TUC
Απόστολος Βουλγαράκης, Αναπληρωτής Καθηγητής, TUC
Εμμανουήλ Γρυλλάκης, Μεταδιδακτορικός Ερευνητής, TUC

Χανιά, Οκτώβριος 2023

Copyright ©TUC, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

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

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

Copyright ©TUC, 2023

All Rights Reserved

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

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

Περίληψη

Η ανάγκη πρόγνωσης των καιρικών συνθηκών γίνεται ολοένα και πιο σημαντική στη σύγχρονη εποχή. Από πλευράς χρηστικότητας, πέρα από την ανάγκη μεγαλύτερης χωρο-χρονικής λεπτομέρειας, υπάρχει μια αυξανόμενη απαίτηση διεύρυνσης του χρονικού ορίζοντα πρόγνωσης. Η απαίτηση αυτή ενισχύεται ιδιαίτερα υπό την επίδραση της ανθρωπογενούς κλιματικής αλλαγής που έχει ως αποτέλεσμα την εκδήλωση καιρικών ακροτήτων όπως καταιγίδες, ακραίους καύσωνες, λειψυδρία κλπ.

Η επιστήμη της πρόγνωσης εποχικής κλίμακας έχει μια ιστορία μεγαλύτερη των 30 ετών. Αρχικά αναπτύχθηκε ως αμιγώς ερευνητική δραστηριότητα από λίγα ακαδημαϊκά και ερευνητικά ιδρύματα, αλλά προσφάτως προσελκύει μεγάλο ενδιαφέρον για το λόγο ότι έχει τη δυνατότητα να προσφέρει χρήσιμη κλιματική πληροφορία σε κατάλληλους χρονικούς ορίζοντες, σε ποικίλους τομείς, όπως για παράδειγμα στη διαχείριση των υδάτινων πόρων. Οι εποχικές προγνώσεις ουσιαστικά περιέχουν ένα εύρος από πιθανές κλιματικές συνθήκες σε χρονικό ορίζοντα πρόγνωσης που φτάνει μέχρι επτά μήνες. Παρότι υπάρχει πληθώρα δεδομένων αυτού του τύπου, ο βαθμός αξιοποίησης τους είναι ακόμα μικρός λόγω της χαμηλής ποιότητας τους αλλά και της δυσχερούς επεξεργασίας τους προκειμένου να μετατραπούν σε χρήσιμη πληροφορία υποστήριξης αποφάσεων.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι ο έλεγχος της ποιότητας των κλιματικών προγνώσεων εποχικού ορίζοντα και η στατιστική επεξεργασία για τη βελτίωση τους, εστιάζοντας στην περιοχή της Κρήτης. Αρχικά αξιολογείται η ικανότητα πρόγνωσης υδροκλιματικών συνθηκών για δύο δημοφιλή επιχειρησιακά συστήματα πρόγνωσης εποχικού ορίζοντα, το σύστημα ECMWF System 5 (ECMWF5) και το Météo-France System 6 (MFS6). Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ένα σύνολο μεθόδων για την βαθμονόμηση των προγνώσεων, την διόρθωση των μεροληπτικών σφαλμάτων, το στατιστικό καταβιβασμό κλίμακας, την πολύ-μεταβλητή επαλήθευση και βελτιστοποίηση με σκοπό τη δημιουργία προσαρμοσμένης εποχικής υδροκλιματικής πρόγνωσης για την περιοχή της Κρήτης. Η επεξεργασία έγινε με τη χρήση του εργαλείου Climate Services Toolbox (CSTools), ενός εξειδικευμένου πακέτου R, που εξυπηρετεί στην αξιολόγηση και βελτίωση της ποιότητας των κλιματικών προγνώσεων εποχιακού έως πολυετούς ορίζοντα.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε έλεγχος της συνέπειας των δυο συστημάτων και βρέθηκε ότι το καλύτερο σύστημα για την περιοχή είναι το ECMWF5, όπως επιβεβαιώνεται και από τη βιβλιογραφία. Στη συνέχεια, η εφαρμογή της βαθμονόμησης οδήγησε στη μείωση του μεροληπτικού σφάλματος έναντι των πλεγματικών δεδομένων επανα-ανάλυσης ERA5. Ιδιαίτερα για το σύστημα ECMWF5 τόσο στη θερμοκρασία όσο και στη βροχόπτωση παρουσιάζει τις μικρότερες αποκλίσεις σε σύγκριση με καταγεγραμμένες τιμές, επομένως θεωρήθηκε αξιόπιστο για περεταίρω επεξεργασία. Ακολούθως, εφαρμόστηκε καταβιβασμός κλίμακας ως ένα θεμελιώδες βήμα για τη μετατροπή των προσομοιώσεων κλίματος από την αρχική αδρομερή χωρική ανάλυση σε

λεπτομερέστερη. Συγκεκριμένα, για τη μεταβλητή της θερμοκρασίας ελέγχθηκε για το καλοκαίρι του 2003, καθώς ήταν το πιο θερμό της περιόδου 1993-2016, σε πανευρωπαϊκό επίπεδο, ενώ για τη βροχόπτωση ελέγχθηκε για το φθινόπωρο του 2002, το πιο υγρό της αντίστοιχης περιόδου.

Τέλος, η μεθοδολογία εφαρμόστηκε για την ανάπτυξη εστιασμένων πιθανολογικών προγνώσεων με αρχική ημερομηνία τη 1^η Οκτωβρίου του 2022 για το χειμώνα του 2023 και για τους δυο πρώτους μήνες της άνοιξης Μάρτιος-Απρίλιος. Αξιολογώντας τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας, λαμβανομένου υπόψη την αυξητική της τάση που αποδίδεται στην ανθρωπογενή κλιματική αλλαγή, οι πιθανότητες για την θερμοκρασία ήταν σε μεγάλο βαθμό ρεαλιστικές. Το ίδιο ισχύει και για τη βροχόπτωση. Όμως, παρατηρήθηκε μια γενική αδυναμία των συστημάτων πρόγνωσης για τη ξηρή περίοδο, Μαΐου-Νοεμβρίου, επομένως υπάρχουν περιθώρια για βελτίωσης των συστημάτων όσο αφορά την προγνωστική ικανότητα.

Οι εποχικές προγνώσεις έχουν μεγάλες δυνατότητες να παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με το κλίμα, που βοηθούν στη λήψη αποφάσεων σε τομείς που συσχετίζονται άμεσα με αυτό. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την πιθανή χρησιμότητα της εποχικής πρόγνωσης για την περιοχή της Κρήτης.

Abstract

The need for weather forecasts is becoming increasingly important in modern times. From a utility point of view, in addition to the need for greater spatio-temporal detail, there is an increasing need to extend the forecast time horizon of our systems. This requirement is particularly strengthened in light of anthropogenic climate change with increased weather extremes such as storms, heat waves and water scarcity.

The science of seasonal forecasting has a history of more than 30 years. Originating as a pure research activity by a few academic and research institutions, it has recently attracted considerable interest because of its potential to provide useful climate information at appropriate time horizons in a variety of areas, such as water resources management. Seasonal forecasts essentially contain a range of possible climate conditions over a forecast horizon of one to seven months. Although there is an abundance of data of this type, the degree of utilization is still low due to their low skill and the difficulty of processing them to transform them into useful information for decision support.

This thesis aims to test the skill of seasonal climate forecasts and apply statistical processing for their improvement, focusing on the region of Crete. First, the predictability skill for one of the two most popular operational seasonal horizon forecasting systems, ECMWF System 5 (ECMWFS5) and Météo-France System 6 (MFS6), is evaluated. A set of methods is then applied for forecast calibration, bias correction, statistical downscaling, multivariate verification, and optimization to generate a tailored seasonal hydroclimate forecast for the region of Crete. The processing was performed using the Climate Services Toolbox (CSTools), a specialized R package that evaluates and improves the quality of seasonal and multi-year climate forecasts.

Initially, a consistency check of the two systems was carried out and it was found that the best system for the area is ECMWFS5, which is also confirmed in the literature. Subsequently, the calibration application reduced the biases against the ERA5 reanalysis. Particularly for ECMWFS5 both temperature and precipitation show the smallest deviations compared to recorded values. Therefore, it was considered reliable for further processing. Downscaling was then applied as a fundamental step to increase the spatial resolution of the forecasts. Specifically, for the temperature variable, it was applied for the summer of 2003, as it was the warmest of the 1993-2016 period at the pan-European level, while for precipitation, it was applied for the autumn of 2002, the wettest of the corresponding period.

Finally, the methodology was applied to develop focused probabilistic forecasts with an initial date of 1 October 2022 for the winter of 2023 and for the first two months of spring March-April. By evaluating the temperature results based on its increasing trend due to climate change, the probabilities for temperature and precipitation were largely realistic. The same applies to

precipitation. However, a weakness of the forecasting systems was observed for the dry season, May to November, so there is room for improvements in predictability.

Seasonal forecasts have great potential to provide valuable climate information that helps in decision-making for climate-related areas. The results confirm the potential usefulness of seasonal forecasting.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κουτρούλη Αριστείδη που με εμπιστεύτηκε και μου ανέθεσε το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ακόμα τον ευχαριστώ για τις ώρες που μου αφιέρωσε και ήταν πάντα εκεί σε ότι και να τον χρειαζόμουν. Η στήριξή του και οι συμβουλές του ήταν πολύτιμες για εμένα.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον κ. Γρυλλάκη Εμμανουήλ για το συμβουλευτικό χαρακτήρα που είχε σε όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας βοηθώντας με να ξεπεράσω μείζονα προβλήματα, ο οποίος διετέλεσε και μέλος της τριμελούς επιτροπής.

Ευχαριστώ τον κ. Βουλγαράκη Απόστολο, ο οποίος διετέλεσε μέλος της τριμελούς επιτροπής μου, και αφιέρωσε χρόνο για την αξιολόγηση της εργασίας μου και για την καθοδήγηση που μου έδωσε για τη μετέπειτα πορεία μου.

Θέλω να ευχαριστήσω, επίσης, τον κ. Σειραδάκη Κωνσταντίνο, τόσο για την σημαντική βοήθεια του στα τεχνικά και μη θέματα. Του είμαι εξαιρετικά ευγνώμων για τους μήνες που μοιράστηκε το γραφείο του μαζί μου.

Είμαι ευγνώμων για τις φίλες μου που πορευθήκαμε μαζί σε όλα τα φοιτητικά μας χρονιά και για τις όμορφες αναμνήσεις που αποκτήσαμε.

Τέλος, δεν θα τα είχα καταφέρει χωρίς την οικογένεια μου, τους γονείς μου Κωνσταντίνο & Κολώνα καθώς και την αδερφή μου Αποστολία, που ήταν πάντα εκεί σε ότι και να χρειαζόμουν. Τους ευχαριστώ πολύ για όλα τα εφόδια που μου έδωσαν και την ασταμάτητη υποστήριξη τους σε εμένα και στις δυνατότητες μου τόσο στις επιτυχίες όσο και στις αποτυχίες σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	1
1.1 Σκοπός και αντικείμενο διπλωματικής εργασίας.....	1
1.2 Εποχική πρόγνωση.....	1
1.2.1 Ανάγκη εποχικής πρόγνωσης	2
1.2.2 Εφαρμογή εποχικής πρόγνωσης σε διάφορους τομείς	2
Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	5
2.1 Συστήματα Εποχικής Πρόγνωσης	5
2.1.1 Σύστημα Εποχικής Πρόγνωσης ECMWF System 5	9
2.1.2 Σύστημα Εποχικής Πρόγνωσης Météo-France System 6	11
2.2 Δεδομένα Παρατήρησης	12
2.2.1 Δεδομένα ERA5 παγκόσμια επανα-ανάλυσης.....	12
2.2.2 Δεδομένα CHIRPS	12
2.3 Εργαλείο CSTools.....	13
2.3.1 Δυνατότητες εργαλείου CSTools.....	13
2.3.2 Συναρτήσεις ανάκτησης και μετασχηματισμού δεδομένων	15
2.3.3 Βαθμονόμηση.....	16
2.3.4 Μέθοδοι καταβιβασμού κλίμακας.....	17
2.3.5 Οπτικοποίηση	18
Κεφάλαιο 3: Δεδομένα & Μεθοδολογία.....	19
3.1 Περιοχή Μελέτης.....	19
3.1.1 Γεωγραφικά & Μορφολογικά Χαρακτηριστικά	19
3.1.2 Κλιματολογία Περιοχής.....	20
3.1.3 Δραστηριότητες Περιοχής.....	21
3.2 Δεδομένα	22
3.3 Μεθοδολογία.....	23
3.3.1 Αξιολόγηση Συνέπειας Εποχικών Προγνώσεων.....	24
3.3.2 Βαθμονόμηση Πρόγνωσης.....	24
3.3.3 Καταβιβασμός Κλίμακας	25
3.3.4 Πιθανολογική Πρόγνωση	29
3.3.5 Δημιουργία Σεναρίου Πρόγνωσης	29
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα	31
4.1 Αξιολόγηση Συνέπειας Εποχικών Προγνώσεων	31
4.1.1 Θερμοκρασία.....	31
4.1.2 Βροχόπτωση	33

4.2	Βαθμονόμηση Πρόγνωσης.....	35
4.2.1	Θερμοκρασία.....	35
4.2.2	Βροχόπτωση	37
4.3	Καταβιβασμός Κλίμακας Πρόγνωσης	39
4.3.1	Θερμοκρασία.....	39
4.3.2	Βροχόπτωση	44
4.4	Πιθανολογική Πρόγνωση	49
4.4.1	Θερμοκρασία.....	49
4.4.2	Βροχόπτωση	52
4.5	Δημιουργία Σεναρίου Πρόγνωσης.....	56
4.5.1	Θερμοκρασία.....	56
4.5.2	Βροχόπτωση	58
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα		61
	Βιβλιογραφία.....	64
	Παραρτήματα.....	74

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Ένα εξαιρετικά απλοποιημένο δενδρικό διάγραμμα αποφάσεων για την ενσωμάτωση πληροφοριών για το κλίμα (των οποίων η εποχική πρόγνωση είναι ένα υποσύνολο) στη διαδικασία λήψης αποφάσεων για μια εφαρμογή επισιτιστικής ασφάλειας(Alberto Troccoli 2010a).	4
Σχήμα 2.1: Χρονοδιάγραμμα και διαδικασίες που εμπλέκονται με αρχικοποιημένες προγνώσεις. Χρονοδιάγραμμα και πηγές προβλεψιμότητας για υποεποχικά έως εποχικά (S2S), εποχιακά έως διαχρονικά (S2I) και εποχιακά έως δεκαετιακά (S2D). Πιο ανοιχτό πράσινο & η σκίαση υποδηλώνει μεγαλύτερη αβεβαιότητα (Meehl et al. 2021).....	6
Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση ορισμένων καιρικών διεργασιών και συστημάτων που λαμβάνονται υπόψη στη μοντελοποίηση υποεποχικής και εποχικής κλίμακας (Barnes et al. 2018).	8
Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση της Νότια Ταλάντωση El Nivio (‘Schematic Diagrams El Nino Theme Page - A Comprehensive Resource’. 2016).	8
Σχήμα 2.4: Σχηματική απεικόνιση της Βορειοατλαντικής Ταλάντωσης (NAO) (‘Climate Variability: North Atlantic Oscillation NOAA Climate.Gov’. 2009).	9
Σχήμα 2.5: Σχήμα της ευέλικτης ροής εργασιών του εργαλείου CSTools (από πάνω προς τα κάτω). Κάθε πλαίσιο αντιπροσωπεύει μία κατηγορία λειτουργιών του εργαλείου (Pérez-Zanón et al. 2022).	14
Σχήμα 2.6: Οι βασικές ενότητες του πακέτου s2dverification (Manubens et al. 2018b).....	16

Σχήμα 3.1: Μέση θερμοκρασία (γραμμές) και μέση βροχόπτωση (μπάρες) του Ηρακλείου, των Χανίων και της Σητείας της περιόδου 1955-2010. Στοιχεία από την Ελληνική Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Markonis et al. 2016).....	20
Σχήμα 3.2: Ενδεικτικό διάγραμμα επεξεργασίας πρωτογενών - δεδομένων εποχικών προγνώσεων και μετατροπής τους σε χρήσιμη πληροφορία.	23
Σχήμα 3.3: Απεικόνιση διαφορετικών αναλύσεων.	25
Σχήμα 3.4: Βήμα προς βήμα ο καταβιβασμός κλίμακας της θερμοκρασίας από ανάλυση 1° σε 0,25°.	26
Σχήμα 3.5: Βήμα προς βήμα ο καταβιβασμός της κλίμακας της βροχόπτωσης από ανάλυση 1° σε 0,05°.	27

Κατάλογος Χαρτών

Χάρτης 2.1: Προγνωστικός χάρτης Ευρώπης του ECMWF με τη πιθανότητα της θερμοκρασίας για τους μήνες Ιουλίου-Αυγούστου- Σεπτεμβρίου 2023 (3-month average)(‘Charts Copernicus’. 2023).	9
Χάρτης 2.2: Προγνωστικός χάρτης του Météo-France με τη πιθανότητα της θερμοκρασίας για τους μήνες Ιουλίου-Αυγούστου- Σεπτεμβρίου 2023 (3-month average)(‘Charts Copernicus’. 2023).	11
Χάρτης 3.1: Υψομετρικός χάρτης της Κρήτης με τις θέσεις των κύριων γεωργικών περιοχών του νησιού (κόκκινες ελλείψεις). Οι μετεωρολογικοί σταθμοί σημειώνονται με μπλε τετράγωνα (Morianou et al. 2018).	19
Χάρτης 4.1: Καλύτερο σύστημα για θερμοκρασία περιόδου Μαΐου-Νοεμβρίου 1993-2016.	31
Χάρτης 4.2: Καλύτερο σύστημα για θερμοκρασία περιόδου Νοεμβρίου-Μαΐου 1993-2016.	32
Χάρτης 4.3: Καλύτερο σύστημα για βροχόπτωση περιόδου Μαΐου-Νοεμβρίου 1993-2016.	33
Χάρτης 4.4: Καλύτερο σύστημα για βροχόπτωση περιόδου Νοεμβρίου-Μαΐου 1993-2016.	33
Χάρτης 4.5: Απεικόνιση μέσου μεροληπτικού σφάλματος θερμοκρασίας περιόδου Μαΐου-Νοεμβρίου 1993-2016 για (α) αρχικό MFS6, (β) αρχικό ECMWFS5, (γ) βαθμονομημένο MFS6 και (δ) βαθμονομημένο ECMWFS5, (οι κλίμακες έχουν διαφορετική διαβάθμιση και εύρος).	35
Χάρτης 4.6: Απεικόνιση του μέσου μεροληπτικού σφάλματος θερμοκρασίας περιόδου Νοεμβρίου-Μαΐου 1993-2016 για (α) αρχικό MFS6, (β) αρχικό ECMWFS5, (γ) βαθμονομημένο MFS6 και (δ) βαθμονομημένο ECMWFS5, (οι κλίμακες έχουν διαφορετική διαβάθμιση και εύρος).	36
Χάρτης 4.7: Απεικόνιση του μέσου μεροληπτικού σφάλματος βροχόπτωσης περιόδου Μαΐου-Νοεμβρίου 1993-2016 για (α) αρχικό MFS6, (β) αρχικό ECMWFS5, (γ) βαθμονομημένο MFS6 και (δ) βαθμονομημένο ECMWFS5, (οι κλίμακες έχουν διαφορετική διαβάθμιση και εύρος).	37
Χάρτης 4.8: Απεικόνιση του μέσου μεροληπτικού σφάλματος βροχόπτωσης περιόδου Νοεμβρίου-Μαΐου 1993-2016 για (α) αρχικό MFS6, (β) αρχικό ECMWFS5, (γ) βαθμονομημένο MFS6 και (δ) βαθμονομημένο ECMWFS5, (οι κλίμακες έχουν διαφορετική διαβάθμιση και εύρος).	38

Χάρτης 4.9: Αρχική εποχική πρόγνωση ECMWFS5 (1°) , Καταβιβασμένη (α) με ορογραφία ,(β) με κλιματολογία ERA5 εποχιακή πρόγνωση ECMWFS5 (0,25°) & ERA5 για τον Ιούνιο 2003.	40
Χάρτης 4.10: Αρχική εποχική πρόγνωση ECMWFS5 (1°) , Καταβιβασμένη (α) με ορογραφία ,(β) με κλιματολογία ERA5 εποχιακή πρόγνωση ECMWFS5 (0,25°) & ERA5 για τον Ιούλιο 2003.	41
Χάρτης 4.11: Αρχική εποχική πρόγνωση ECMWFS5 (1°) , Καταβιβασμένη (α) με ορογραφία ,(β) με κλιματολογία ERA5 εποχιακή πρόγνωση ECMWFS5 (0,25°) & ERA5 για τον Αύγουστο 2003.	42
Χάρτης 4.12: Απεικόνιση της συνολικής μηνιαίας βροχόπτωσης για το Σεπτέμβριο του 2002 σε κάθε φάση επεξεργασίας: (α) αρχική πρόγνωση συστήματος ECMWFS5 σε 1° , (β) βαθμονόμηση πρόγνωσης συστήματος ECMWFS5 1° , (γ) ορογραφικά βάρη σε 0,05° , (δ) καταβιβασμός κλίμακας με ορογραφικά βάρη σε 0,05° και (ε) ERA5 σε 0,25°	45
Χάρτης 4.13: Απεικόνιση της συνολικής μηνιαίας βροχόπτωσης για το Οκτώβριο του 2002 σε κάθε φάση επεξεργασίας: (α) αρχική πρόγνωση συστήματος ECMWFS5 σε 1° , (β) βαθμονόμηση πρόγνωσης συστήματος ECMWFS5 1° , (γ) ορογραφικά βάρη σε 0,05° , (δ) καταβιβασμός κλίμακας με ορογραφικά βάρη σε 0,05° και (ε) ERA5 σε 0,25°	46
Χάρτης 4.14: Απεικόνιση της συνολικής μηνιαίας βροχόπτωσης για το Νοέμβριο του 2002 σε κάθε φάση επεξεργασίας: (α) αρχική πρόγνωση συστήματος ECMWFS5 σε 1° , (β) βαθμονόμηση πρόγνωσης συστήματος ECMWFS5 1° , (γ) ορογραφικά βάρη σε 0,05° , (δ) καταβιβασμός κλίμακας με ορογραφικά βάρη σε 0,05° και (ε) ERA5 σε 0,25°	47
Χάρτης 4.15: Πιθανότητα θερμοκρασίας κάτω του κανονικού, εντός του κανονικού εύρους και πάνω του κανονικού για το χειμώνα του 2023.	49
Χάρτης 4.16: Πιθανότητα θερμοκρασίας κάτω του κανονικού, κανονικού και πάνω του κανονικού για τον Μάρτη, Απρίλη του 2023.	50
Χάρτης 4.17: Πιθανότητα βροχόπτωσης κάτω του κανονικού, κανονικού και πάνω του κανονικού για το χειμώνα του 2023.	52
Χάρτης 4.18: Πιθανότητα βροχόπτωσης κάτω του κανονικού, κανονικού και πάνω του κανονικού για τον Μάρτη, Απρίλη του 2023.	53
Χάρτης 4.19: Σενάριο θερμοκρασίας για το χειμώνα (Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος) του 2023.	56
Χάρτης 4.20: Σενάριο θερμοκρασίας για τους μήνες Μαρτίου-Απριλίου του 2023.....	57
Χάρτης 4.21: Σενάριο βροχόπτωσης για το χειμώνα (Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος) του 2023.	58
Χάρτης 4.22: Σενάριο βροχόπτωσης για τους μήνες Μαρτίου-Απριλίου του 2023.....	59

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Γενικά χαρακτηριστικά των μοντέλων εποχικής πρόγνωσης (Meehl et al. 2021).	5
Πίνακας 2.2: Εκδόσεις των μοντέλων ατμόσφαιρας και ωκεανών και προσθέτει ένα νέο διαδραστικό μοντέλο θαλάσσιου πάγου κλπ. του SEAS5 (Johnson et al. 2019).	10
Πίνακας 2.3: Εκδόσεις των μοντέλων ατμόσφαιρας, ωκεανών, επιφάνειας και μοντέλο θαλάσσιου πάγου κλπ. του MFS6 (alaingradot 2017).....	12

Πίνακας 4.1: Μέσες τιμές του συνόλου των κελιών της περιοχής ανάλυσης για το μέσο μεροληπτικό σφάλμα της θερμοκρασίας για περιόδους Μαΐου-Νοεμβρίου 1993-2016 και Νοεμβρίου-Μαΐου 1993-2016 των πρωτογενών και βαθμονομημένων συστημάτων.	37
Πίνακας 4.2: Μέσες τιμές του συνόλου των κελιών της περιοχής ανάλυσης για το μέσο μεροληπτικό σφάλμα της βροχόπτωσης για περιόδους Μαΐου-Νοεμβρίου 1993-2016 και Νοεμβρίου-Μαΐου 1993-2016 των πρωτογενών και βαθμονομημένων συστημάτων. .	39
Πίνακας 4.3: Μέγιστη και Ελάχιστη Θερμοκρασία που προκύπτει από την αρχική πρόγνωση, την καταβιβασμένη πρόγνωση με ορογραφία, την καταβιβασμένη πρόγνωση με κλιματολογία και δεδομένα παρατήρησης ERA5	43
Πίνακας 4.4: Μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας σε επιλεγμένους σταθμούς, δεδομένα για την περίοδο 1955-2010 από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία και περίοδο 2022-2023 από το Meteo. Με Bold είναι οι τιμές της περιόδου 2022-2023 με μεγαλύτερη τιμή από της περιόδου 1955-2010.	52
Πίνακας 4.5: Συνολικές μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης σε επιλεγμένους σταθμούς, δεδομένα για την περίοδο 1955-2010 από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία και περίοδο 2022-2023 από το Meteo. Με Bold είναι οι τιμές της περιόδου 2022-2023 με μεγαλύτερη τιμή από της περιόδου 1955-2010.	54
Πίνακας 4.6: Συνολικές μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης από ERA5 , δεδομένα για την περίοδο 1993-2023 αφορούν όλη την Κρήτη και για την περίοδο 2022-2023 αφορά τη δυτική, κεντρική, ανατολική Κρήτη. Με Bold είναι οι τιμές της περιόδου 2022-2023 με μεγαλύτερη τιμή από της περιόδου 1993-2023.	55

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός και αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο έλεγχος της συνέπειας των κλιματικών προγνώσεων εποχικού ορίζοντα και η στατιστική επεξεργασία για τη βελτίωση τους, εστιάζοντας στην περιοχή της Κρήτης. Οι εποχικές προγνώσεις ουσιαστικά περιέχουν ένα εύρος από πιθανές κλιματικές συνθήκες με χρονικό ορίζοντα πρόγνωσης μέχρι και επτά μήνες. Παρότι υπάρχει πληθώρα δεδομένων αυτού του τύπου, ο βαθμός αξιοποίησης τους είναι ακόμα μικρός λόγω της χαμηλής πιστότητας τους αλλά και της δυσχερούς επεξεργασίας τους προκειμένου να μετατραπούν σε χρήσιμη πληροφορία υποστήριξης αποφάσεων. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής αξιολογείται η ικανότητα πρόγνωσης υδροκλιματικών συνθηκών για ένα σύνολο συστημάτων πρόγνωσης εποχικού ορίζοντα. Εφαρμόζεται ένα σύνολο μεθόδων για την βαθμονόμηση των προγνώσεων, την διόρθωση των μεροληπτικών σφαλμάτων, τον στατιστικό καταβιβασμό κλίμακας, τη πολύ-μεταβλητή επαλήθευση και βελτιστοποίηση με σκοπό τη δημιουργία προσαρμοσμένης εποχικής υδροκλιματικής πρόγνωσης για την περιοχή της Κρήτης.

1.2 Εποχική πρόγνωση

Τα τελευταία 30 χρόνια, η επιστήμη της πρόγνωσης των εποχικών διακυμάνσεων του καιρού έχει αναπτυχθεί με αφορμή την ερευνητική δραστηριότητα εξιδεικευμένων ακαδημαϊκών και ερευνητικών κέντρων (Cane, Zebiak, and Dolan 1986). Σε αντίθεση με τις συμβατικές προβλέψεις καιρού, οι εποχικές προγνώσεις δεν επιχειρούν να προβλέψουν την λεπτομερή καθημερινή εξέλιξη του καιρού. Μια τέτοια λεπτομερής πρόγνωση είναι αδύνατη καθώς το κλιματικό σύστημα καθορίζεται από τη χαοτική φύση (A. M. Selvam 2007). Αντίθετα, οι εποχικές προγνώσεις παρέχουν κλιματικές εκτιμήσεις εποχικού ορίζοντα, μέχρι και επτά μήνες. Ως εκ τούτου, για παράδειγμα, μια εποχική πρόγνωση μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με το πόσο πιθανό είναι η επόμενη σεζόν να είναι πιο υγρή, ξηρότερη, θερμότερη ή ψυχρότερη σε σχέση με την κλιματολογία (A Weisheimer and Palmer, n.d.). Το φυσικό υπόβαθρο αυτών των εκτιμήσεων βασίζεται στην πρόβλεψη δυναμικών τάσεων εποχικής κλίμακας που έχουν να κάνουν περισσότερο με την επιρροή της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας από τους ωκεανούς και λιγότερο από τη χερσαία επιφάνεια (Palmer and Anderson 1994).

1.2.1 Ανάγκη εποχικής πρόγνωσης

Η ανάγκη πρόγνωσης των καιρικών συνθηκών έχει γίνει ολοένα και πιο σημαντική στη σύγχρονη εποχή, ειδικά με την αυξανόμενη επίδραση της κλιματικής αλλαγής και την αύξηση στην εκδήλωση ακραίων καιρικών φαινομένων όπως καταιγίδες, ακραίοι καύσωνες, λειψυδρία κλπ. (P. Stott 2016). Παράγοντες όπως η συχνότητα, η ένταση και η διάρκεια των ακραίων καιρικών φαινομένων έχουν αυξηθεί τις τελευταίες δεκαετίες με σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη ζωή, στο περιβάλλον και στις υποδομές. Επομένως η προοπτική της πρόγνωσης αυτών των φαινομένων σε μεγαλύτερο βάθος χρόνου, για τις επόμενες εποχές, παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον τόσο από επιστημονική αλλά και πρακτική εφαρμογή (Smith, Scaife, and Kirtman 2012).

1.2.2 Εφαρμογή εποχικής πρόγνωσης σε διάφορους τομείς

Γενικότερα οι κλιματικές πληροφορίες σχετίζονται με ποικίλους χρήστες, και ως εκ τούτου ευαίσθητες καιρικές συνθήκες μπορούν να επηρεάσουν τις αποφάσεις που λαμβάνονται σε σχετικούς τομείς. Ως αποτέλεσμα, οι εποχικές προγνώσεις χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε ένα μεγάλο εύρος τομέων εφαρμογής (A. Weisheimer and Palmer 2014a).

Στόχος της Ευρώπης μέχρι το 2050 είναι η απανθρακοποίηση, δηλαδή η σταδιακή εξάλειψη της χρήσης του άνθρακα ως πηγής ενέργειας, που περιλαμβάνει τον αποκλεισμό ή τη μείωση της χρήσης ορυκτού άνθρακα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης.

Ακόμα έχει θεσπιστεί ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα παράσχουν το 75% έως 100% της ηλεκτρικής ενέργειας, όπου τουλάχιστον το 60% αυτής να προέρχεται από αιολική και ηλιακή ενέργεια (Tsiropoulos et al. 2020). Επιπλέον τα περισσότερα σενάρια σταθεροποίησης του κλίματος προϋποθέτουν την απανθρακοποίηση έως το 2050, η οποία επεκτείνεται στην ηλεκτροδότηση και στην απαλλαγή από τον άνθρακα τμημάτων της βιομηχανίας και των μεταφορών (Hirth 2013). Επομένως είναι επιτακτική ανάγκη των καιρών η στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Ο ενεργειακός τομέας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μεταβλητότητα του κλίματος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς η ζήτηση και η προσφορά ενέργειας εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες (Dubus, Muralidharan, and Troccoli 2018). Για παράδειγμα, ψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες συνεπάγονται υψηλή ενεργειακή ζήτηση για ψύξη και θέρμανση, αντίστοιχα (Staffell and Pfenninger 2017).

Η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές όπως είναι οι εγκαταστάσεις υδροηλεκτρικής, ηλιακής και αιολικής ενέργειας είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στις εποχικές ή πολυετείς κλιματικές διακυμάνσεις και τις μακροπρόθεσμες τάσεις του κλίματος (Llorenç Lledó et al. 2018, Alberto Troccoli et al. 2012). Οι πρόσφατες βελτιώσεις στον τομέα της μακροπρόθεσμης καιρικής πρόγνωσης καθιστούν πλέον δυνατή την εκ των προτέρων ενημέρωση για τις συνθήκες, που πιθανώς να επικρατήσουν τους επόμενους μήνες (Francisco J. Doblas-

Reyes et al. 2013). Ειδικότερα, οι εποχικές κλιματικές προγνώσεις για την ταχύτητα του ανέμου έχουν αποδειχθεί χρήσιμες για τη βιομηχανία της αιολικής ενέργειας (Ll Lledó et al. 2019).

Οι κλιματικές μεταβολές έχουν τεράστιο αντίκτυπο στο τομέα της γεωργίας, καθώς επηρεάζουν άμεσα την παραγωγικότητα της και έμμεσα την οικονομία σε περιφερειακή και εθνική κλίμακα (Cogato et al. 2019). Μια καθημερινή πρόκληση που αντιμετωπίζουν οι γεωργοί είναι να λαμβάνουν αποφάσεις διαχείρισης ενόψει αυτής της μεταβλητότητας του κλίματος. Η δυνατότητα ελαχιστοποίησης των απωλειών σε περιπτώσεις ξηρασίας και η αξιοποίηση των ευνοϊκών εποχών καθιστούν την εποχική πρόγνωση ένα σημαντικό εργαλείο στο τομέα της γεωργίας (Ash et al. 2007). Δηλαδή η εξελιγμένη πληροφορία με τη μορφή των εποχικών κλιματικών προγνώσεων έχουν τη δυνατότητα να βελτιώσουν τη λήψη αποφάσεων των γεωργών, οδηγώντας σε αύξηση των κερδών των γεωργικών εκμεταλλεύσεων με άμεσα οφέλη στην οικονομία (Meza, Hansen, and Osgood 2008).

Ακόμα μια τεράστια πρόκληση είναι η μετατροπή των καιρικών δεδομένων σε χρήσιμη πληροφορία για τη λήψη αποφάσεων για δράσεις διαχείρισης, όπως η άρδευση, η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας και η διαχείριση των υδάτινων πόρων (Bader, Piedelievre, and Lamagat 2006). Πολύτιμες θεωρούνται οι κλιματικών πληροφοριών, καθώς μπορούν να αξιοποιηθούν στην κατασκευή υδραυλικών έργων, όπως φράγματα και στη σωστή διαχείριση τους (Viel et al. 2016). Επιπλέον, η εκτίμηση της ποσότητας νερού που διατίθεται στην περιοχή από τις βροχοπτώσεις μπορεί να βοηθήσει στην καλύτερη αντιμετώπιση των προβλημάτων που σχετίζονται με την έλλειψη νερού σε περιόδους ξηρασίας. Από τη βιβλιογραφία επιβεβαιώνεται ότι η συνεργασία και η προσαρμογή των δεδομένων πρόγνωσης σε θέματα διαχείρισης υδατικών πόρων επηρεάζουν θετικά τη λήψη αποφάσεων (Feldman and Ingram 2009).

1.2.2.1 Παράδειγμα εφαρμογής

Ένα από τα κλειδιά για την ανάδειξη των εποχικών προγνώσεων έγκειται στον τρόπο με τον οποίο οι πληροφορίες και ιδιαίτερα η αβεβαιότητα, κοινοποιούνται στην λήψης αποφάσεων όπως στο **Σχήμα 1.1**. Αφορά την επάρκεια αποθεμάτων καλλιέργειών σε εθνικές ανάγκες για την επόμενη εποχή, μια τυπική πλέον εφαρμογή επισιτιστικής ασφάλειας σε υπανάπτυκτες χώρες. Αν υποθεθεί η ακόλουθη κατάσταση: ένα εκατομμύριο άνθρωποι μπορεί να κινδυνεύουν από λιμό - ο κίνδυνος εξαρτάται από την ποσότητα του αποθέματος τροφίμων και από τις προβλεπόμενες κλιματικές συνθήκες. Προκειμένου να αποφασιστεί ο καλύτερος τρόπος δράσης, δηλαδή να μειωθεί ο κίνδυνος λιμοκτονίας με την εξασφάλιση επαρκούς ποσότητας τροφίμων για τον πληθυσμό, θα μπορούσε να κατασκευαστεί ένα δενδρικό διάγραμμα αποφάσεων, όπως στο **Σχήμα 1.1**.

Εάν τα αποθέματα των καλλιεργειών είναι επαρκή, τότε δεν απαιτείται κάποια δράση. Ωστόσο, εάν τα αποθέματα δεν επαρκούν, πρέπει να αξιολογηθούν οι

διαθέσιμες επιλογές. Ας υποτεθεί ότι οι μόνες διαθέσιμες πληροφορίες είναι (α) μια εποχική πρόβλεψη του κλίματος και (β) οι διεθνείς τιμές των τροφίμων. Έτσι για παράδειγμα σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εποχικής πρόγνωσης δίνεται:

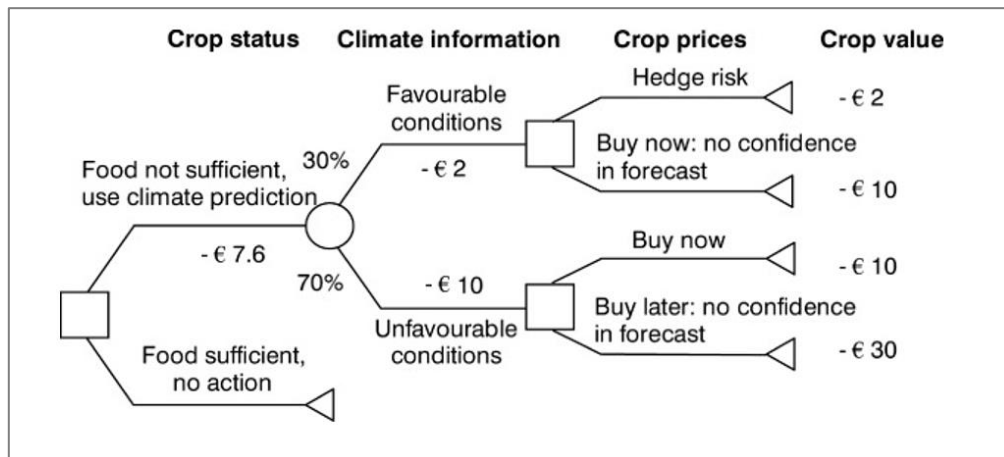
- 30% πιθανότητα οι βροχοπτώσεις να είναι επαρκείς για την καλλιέργεια αρκετών τροφίμων για την κάλυψη των εθνικών αναγκών.
- 70% πιθανότητα οι βροχοπτώσεις να μην είναι επαρκείς για την καλλιέργεια αρκετών τροφίμων για την κάλυψη των εθνικών αναγκών.

Για τις τιμές των καλλιεργειών υπάρχουν δύο επιλογές:

- αγορά τροφίμων εκ των προτέρων με κόστος 10 εκατ. ευρώ, και
- αγορά τροφίμων μετά την έναρξη της καλλιεργητικής περιόδου με κόστος 30 εκατ. ευρώ

Έτσι, για δυσμενείς προβλεπόμενες κλιματικές συνθήκες, οι επιλογές η εκ των προτέρων αγορά και δαπάνη 10 εκατ. ή η εκ των υστέρων αγορά με δαπάνη τρεις φορές περισσότερο. Στην περίπτωση ευνοϊκών συνθηκών, οι επιλογές είναι η εκ των προτέρων αγορά και δαπάνη 10 εκατ. ή η αγορά αντιστάθμισης ρίσκου (π.χ. ασφάλιση) η οποία θεωρείται ότι κοστίζει 2 εκατ. ευρώ.

Στο παρόν παράδειγμα, είναι απλό να εκτιμηθεί ποια είναι η βέλτιστη από οικονομικής άποψης ενέργεια. Εάν τα αποθέματα καλλιεργειών δεν επαρκούν τότε η μια επιλογή είναι η αντιστάθμιση κίνδυνου με κόστος 2 εκατ. ευρώ ή η εκ των προτέρων αγορά τροφίμων με κόστος 10 εκατ. ευρώ (Nicholls 1999, A Troccoli et al. 2008).



Σχήμα 1.1: Ένα εξαιρετικά απλοποιημένο δένδρικό διάγραμμα αποφάσεων για την ενσωμάτωση πληροφοριών για το κλίμα (των οποίων η εποχική πρόγνωση είναι ένα υποσύνολο) στη διαδικασία λήψης αποφάσεων για μια εφαρμογή επισιτιστικής ασφάλειας (Alberto Troccoli 2010a).

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

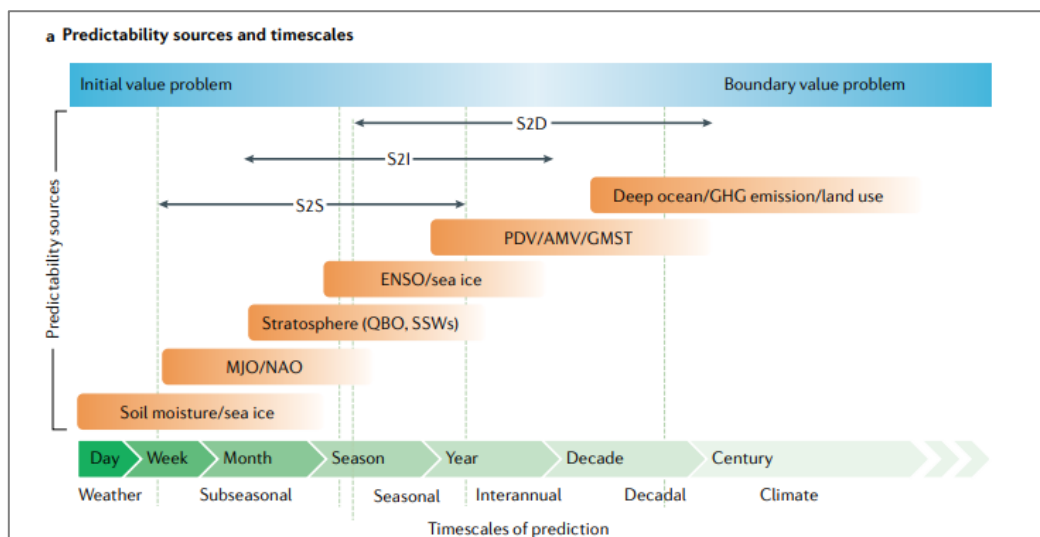
2.1 Συστήματα Εποχικής Πρόγνωσης

Το κλειδί για την εξέλιξη της εποχικής πρόγνωσης ήταν η εκτεταμένη χρήση πολύπλοκων δυναμικών μοντέλων που επέτρεψαν άνευ προηγουμένου λεπτομερείς έρευνες του κλιματικού συστήματος, κατά συνέπεια μια βελτιωμένη κατανόηση της δυναμικής εξέλιξης των κύριων διεργασιών του συστήματος της Γης, συμπεριλαμβανομένης και της αλληλεπίδρασής τους (Alberto Troccoli 2010b). Ο ορίζοντας πρόγνωσης ενός μοντέλου μακροπρόθεσμης-εποχικής πρόγνωσης είναι συνήθως έως και επτά μήνες (A. Weisheimer et al. 2009). Όμως αυτό διαφέρει ανάλογα τον οργανισμό ανάπτυξης της πρόγνωσης όπως και άλλους παράγοντες που συνοψίζονται στον Πίνακα 2.1.

Υπο-εποχικά έως Εποχικά Μοντέλα			
Αριθμός μοντέλων			18
Ατμοσφαιρική ανάλυση και επίπεδα	25–200km & 17–91 επίπεδα	Διακριτοποίηση ωκεανών και επίπεδα	8–200km & 25–75 επίπεδα
Τα στοιχεία αρχικοποίησης	ατμόσφαιρα, ωκεανός, πάγος ξηράς και θάλασσας	Αρχικοποίηση	Πλήρες πεδίο
Αριθμός προσομοιώσεων	4–51	Εύρος πρόγνωσης	31–62 ημέρες
Εποχικά έως Διαχρονικά Μοντέλα			
Αριθμός μοντέλων			13
Ατμοσφαιρική ανάλυση και επίπεδα	36–200km & 24–95 επίπεδα	Διακριτοποίηση ωκεανών και επίπεδα	25–200km & 24–74 επίπεδα
Τα στοιχεία αρχικοποίησης	ατμόσφαιρα, ωκεανός, πάγος ξηράς και θάλασσας	Αρχικοποίηση	Πλήρες πεδίο
Αριθμός προσομοιώσεων	10–51	Εύρος πρόγνωσης	6–12 μήνες

Πίνακας 2.1: Γενικά χαρακτηριστικά των μοντέλων εποχικής πρόγνωσης (Meehl et al. 2021).

Τα μοντέλα εποχικής πρόγνωσης λαμβάνουν υπόψη φαινόμενα που προέρχονται από τον ωκεανό και σε μικρότερο βαθμό την σχέση της επιφάνειας της γης με την ατμόσφαιρα (Palmer and Anderson 1994). Όπως φαίνεται και από το **Σχήμα 2.1** η εποχική πρόγνωση επηρεάζεται κυρίως από το φαινόμενο ENSO, ένα φαινόμενο συσχέτισης ωκεανού-ατμόσφαιρας, που λαμβάνει χώρα κυρίως στον τροπικό Ειρηνικό ωκεανό (Jin et al. 2008).



Σχήμα 2.1: Χρονοδιάγραμμα και διαδικασίες που εμπλέκονται με αρχικοποιημένες προγνώσεις. Χρονοδιάγραμμα και πηγές προβλεψιμότητας για υποεποχικά έως εποχικά (S2S), εποχιακά έως διαχρονικά (S2I) και εποχιακά έως δεκαετιακά (S2D). Πιο ανοιχτό πράσινο & η σκίαση υποδηλώνει μεγαλύτερη αβεβαιότητα (Meehl et al. 2021).

Όμως σε περιοχές όπως η Ευρώπη, η ασθενής σχέση μεταξύ του ωκεάνιου φαινομένου El Niño και των κλιματικών μεταβολών καθιστά τις προγνώσεις λιγότερο ακριβείς (Brands 2017). Για το λόγο αυτό πλήθος Ευρωπαϊκά χρηματοδοτούμενα ερευνητικά προγράμματα, όπως τα SPECS, DEMETER, ENSEMBLES και EUPHORIAS εργάστηκαν για την περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωση των εποχικών προγνώσεων όχι μόνο σε ευρωπαϊκή αλλά και σε παγκόσμια κλίμακα. Όμως, αυτές οι εξελίξεις στη μοντελοποίηση είναι εξαιρετικά δυναμικές και απαιτούν συνεχείς δοκιμές ως βάση για τις περαιτέρω βελτιώσεις των επόμενων εκδόσεων των συστημάτων εποχικής πρόγνωσης (Costa-Saura et al. 2022).

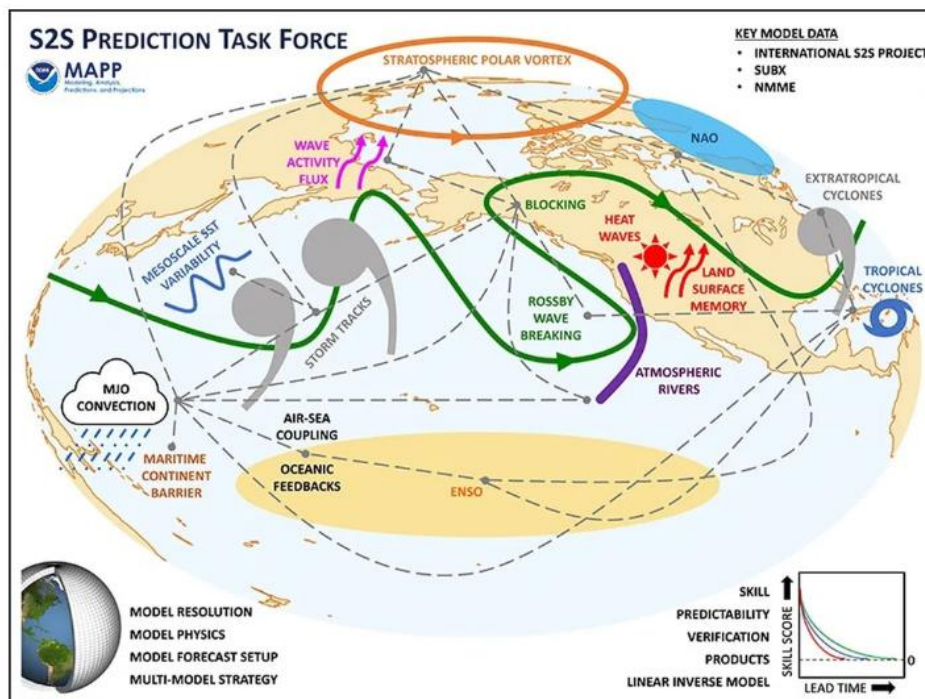
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, παρά την παγκόσμια βελτίωση της εποχικής πρόγνωσης, η ικανότητα πρόβλεψης της θερμοκρασία και της βροχόπτωσης σε ορισμένες περιοχές, όπως η Ευρώπη, παραμένει σχετικά χαμηλή. Από τη μία πλευρά, η έντονη τάση θέρμανσης από τη δεκαετία του 1980 αποτυπώνεται καλά από τις περισσότερες παρελθοντικές (hindcasts) εποχικές προγνώσεις πάνω από την Ευρώπη, οι οποίες παρέχουν σημαντική ικανότητα πρόβλεψης για τη θερμοκρασία (F. J. Doblas-Reyes et al. 2006). Από την άλλη πλευρά, η ικανότητα πρόβλεψης της διακύμανσης γύρω από τις τάσεις θέρμανσης είναι πολύ χαμηλή (Antje Weisheimer et al. 2011). Αυτό οφείλεται κυρίως στο

γεγονός ότι η κλιματική μεταβλητότητα στην Ευρώπη επηρεάζεται από διάφορους μηχανισμούς, όπως η Βορειοατλαντική Ταλάντωση (NAO) (Rogers 1997, Rodwell, Rowell, and Folland 1999), η ανώμαλη συχνότητα ενός συνόλου καιρικών καθεστώτων ('Dynamics of Weather Regimes: Quasi-Stationary Waves and Blocking in: Monthly Weather Review Volume 110 Issue 9 (1982)' n.d., Cassou, Terray, and Phillips 2005, Hazeleger et al. 2012), πολύπλοκες τηλεδιασυνδέσεις με την Αρκτική (Cohen et al. 2014) και με τις τροπικές περιοχές (Kutiel and Benaroch, n.d., Shaman and Tziperman 2011, Behera et al. 2013) και τη σύζευξη μεταξύ της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας της γης (Erich M. Fischer et al. 2007, E. M. Fischer et al. 2007, Hazeleger et al. 2012).

Όλες αυτές οι διεργασίες δεν αναπαρίστανται επαρκώς στα μοντέλα εποχικής πρόγνωσης, γεγονός που θα μπορούσε να εξηγήσει την ανεπαρκή υλοποίηση τους πάνω στην Ευρώπη (Jaeger and Seneviratne 2011, Kim, Webster, and Curry 2012, Scaife et al. 2011). Ακόμα, σε μια πρώιμη μελέτη των Schaër et al. n.d. είχαν δείξει την ύπαρξη μιας ανατροφοδότησης εδάφους-κατακρημνισμάτων πάνω από την Ευρώπη. Αργότερα, αποδείχθηκε ότι το έδαφος επηρεάζει τις βροχοπτώσεις, τη θερμοκρασία και τις ακραίες θερμοκρασίες πάνω από την Ευρώπη (E. M. Fischer et al. 2007; Erich M. Fischer et al. 2007, Douville 2010, Seneviratne et al. 2006; Quesada et al. 2012, Seneviratne et al. 2010, Bellprat et al. 2013).

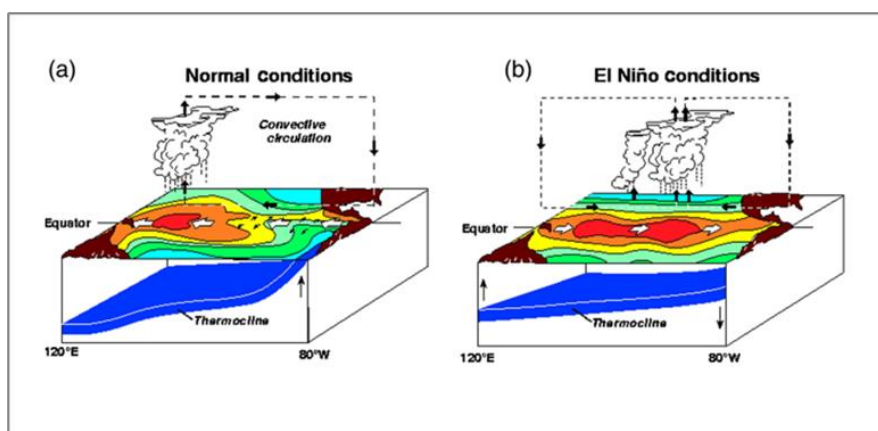
Στο **Σχήμα 2.2**, απεικονίζει φαινόμενα που επηρεάζουν την προβλεψιμότητα των υποεποχικών έως εποχικών συστημάτων (S2S) που έχουν αναφερθεί παραπάνω όπως:

- Νότια Ταλάντωση El Niño (ENSO)
- Βορειοατλαντική Ταλάντωση (NAO)
- Ακραία φαινόμενα (π.χ. κύματα καύσωνα (heat waves), ατμοσφαιρικά ποτάμια (atmospheric rivers), τροπικοί κυκλώνες (tropical cyclones))



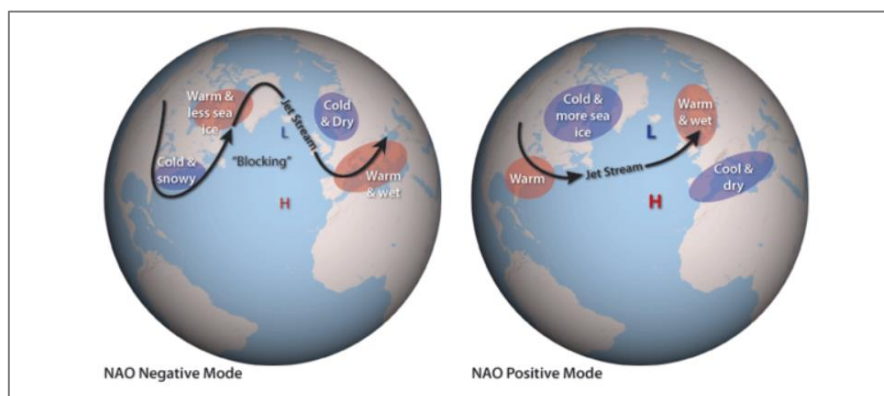
Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση ορισμένων καιρικών διεργασιών και συστημάτων που λαμβάνονται υπόψη στη μοντελοποίηση υποεποχικής και εποχικής κλίμακας (Barnes et al. 2018).

Πιο αναλυτικά το Ελ Νίνιο (El Niño Southern Oscillation, ENSO), χαρακτηρίζεται από ασυνήθιστα υψηλές θερμοκρασίες των ωκεανών στον Ισημερινό Ειρηνικό, ουσιαστικά είναι μια «ταλάντωση» του συστήματος ωκεάνιας-ατμόσφαιρας στον τροπικό Ειρηνικό με σημαντικές συνέπειες για τον καιρό σε όλο τον κόσμο. Μεταξύ αυτών των συνεπειών είναι οι αυξημένες βροχοπτώσεις στη νότια περιοχή των ΗΠΑ και στο Περού, που έχουν προκαλέσει καταστροφικές πλημμύρες, και η ξηρασία στον Δυτικό Ειρηνικό, που μερικές φορές συνδέεται με καταστροφικές πυρκαγιές στην Αυστραλία (‘What Is El Niño? | El Niño Theme Page - A Comprehensive Resource’. 2016).



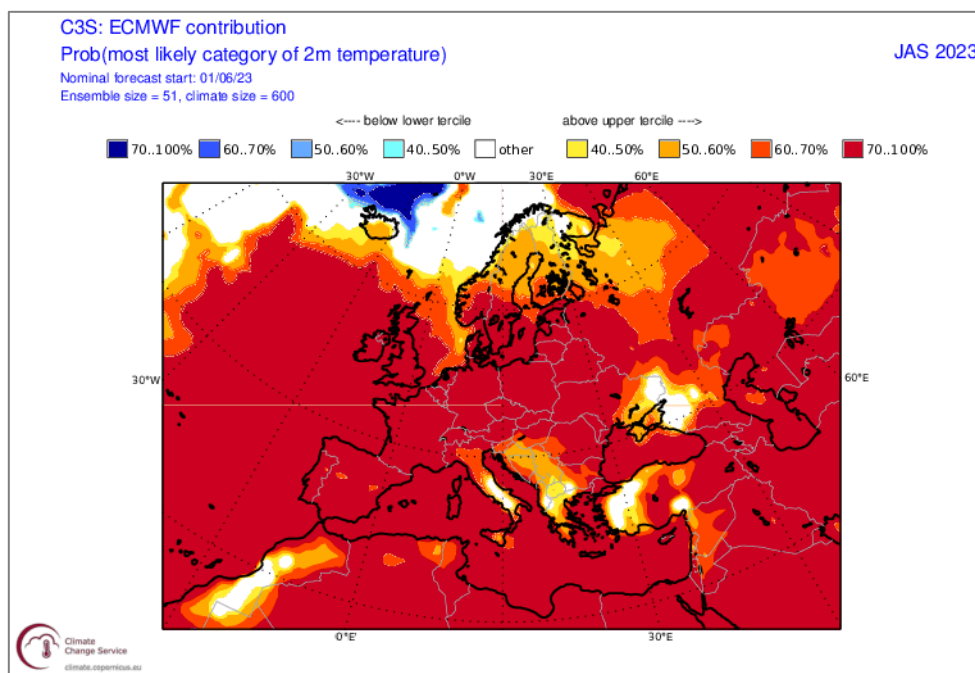
Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση της Νότια Ταλάντωση Ελ Νίνιο (‘Schematic Diagrams | El Niño Theme Page - A Comprehensive Resource’. 2016).

Άλλο ένα φαινόμενο που επηρεάζει τα την εποχικότητα του κλίματος είναι το φαινόμενο της Βορειοατλαντικής Ταλάντωσης (North Atlantic Oscillation, NAO), μια ημισφαιρική μεσημβρινή ταλάντωση των ατμοσφαιρικών μαζών με κέντρα δράσης κοντά στην Ισλανδία και πάνω από τον υποτροπικό Ατλαντικό. Οι επιπτώσεις του NAO στο χειμερινό κλίμα εκτείνονται από τη Φλόριντα μέχρι τη Γροιλανδία και από τη βορειοδυτική Αφρική πάνω από την Ευρώπη μέχρι τη βόρεια Ασία. Τις τελευταίες 3 δεκαετίες, η φάση του NAO μετατοπίζεται από κυρίως αρνητικές σε κυρίως θετικές τιμές του δείκτη (Wang, Ting, and Kushner 2017).



Σχήμα 2.4: Σχηματική απεικόνιση της Βορειοατλαντικής Ταλάντωσης (NAO) ('Climate Variability: North Atlantic Oscillation | NOAA Climate.Gov'. 2009).

2.1.1 Σύστημα Εποχικής Πρόγνωσης ECMWF System 5



Χάρτης 2.1: Προγνωστικός χάρτης Ευρώπης του ECMWF με τη πιθανότητα της θερμοκρασίας για τους μήνες Ιουλίου-Αυγούστου- Σεπτεμβρίου 2023 (3-month average)('Charts | Copernicus'. 2023).

Το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμης Καιρικής Πρόγνωσης (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) έθεσε σε επιχειρησιακή λειτουργία το Νοέμβριο του 2017 το σύστημα εποχικής πρόγνωσης πέμπτης γενιάς, το System5. Η ομάδα του ECMWF5 ακολουθεί μια πορεία έρευνας και ανάπτυξης μακροπρόθεσμης πρόγνωσης που διαρκεί περίπου 30 χρόνια, από το 1997 (Molteni et al. 2011).

Το ECMWF System 5 (SEAS5) διαθέτει αναβαθμισμένες εκδόσεις και αυξημένη ανάλυση των ατμοσφαιρικών και ωκεάνιων μοντέλων, καθώς και την προσθήκη του διαδραστικού μοντέλου θαλάσσιου πάγου LIM2. Το ωκεάνιο μοντέλο έχει επίσης αναβαθμιστεί με βελτιωμένη φυσική, αυξημένη οριζόντια και κατακόρυφη ανάλυση, και μια αντίστοιχη επανα-ανάλυση των ωκεανών και του θαλάσσιου πάγου με σύγχρονα επανεπεξεργασμένα σύνολα δεδομένων παρατήρησης (Johnson et al. 2019).

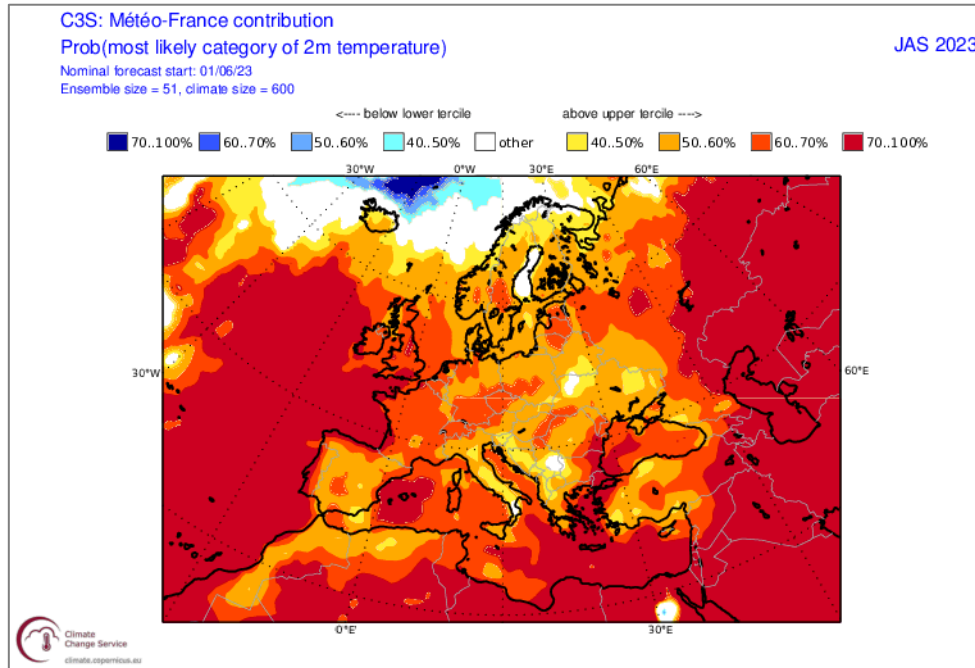
Μια σημαντική βελτίωση του συστήματος είναι η μείωση της μεροληψίας της ψυχρής «γλώσσας» του Ισημερινού Ειρηνικού, η οποία συνοδεύεται από ένα πιο ρεαλιστικό εύρος της νότιας ταλάντωσης του Ελ Νίνιο και μια βελτίωση στην ικανότητα πρόγνωσης της στον κεντροδυτικό Ειρηνικό. Οι βελτιώσεις στην ικανότητα πρόγνωσης της θερμοκρασίας είναι επίσης σαφείς στον τροπικό Ειρηνικό.

Στο **Πίνακα 2.2** φαίνονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του συστήματος και οι εκδόσεις των μοντέλων ατμόσφαιρας, ωκεανών και του νέου διαδραστικού μοντέλου προσομοίωσης θαλάσσιου πάγου.

ECMWF System 5 (SEAS5)	
IFS horizontal resolution (dynamics)	T319
IFS horizontal resolution (physics)	O320 (36 km)
IFS vertical resolution (Top of atmosphere)	L91 (0.01 hPa)
IFS model stochastic physics	3-scale SPPT and SKEB
Ocean model	NEMO v3.4.1
Ocean horizontal resolution	ORCA 0.25
Ocean vertical resolution	L75
Sea-ice model	LIM2

Πίνακας 2.2: Εκδόσεις των μοντέλων ατμόσφαιρας και ωκεανών και προσθέτει ένα νέο διαδραστικό μοντέλο θαλάσσιου πάγου κλπ. του SEAS5 (Johnson et al. 2019).

2.1.2 Σύστημα Εποχικής Πρόγνωσης Météo-France System 6



Χάρτης 2.2: Προγνωστικός χάρτης του Météo-France με τη πιθανότητα της θερμοκρασίας για τους μήνες Ιουλίου–Αυγούστου– Σεπτεμβρίου 2023 (3-month average)(‘Charts | Copernicus’. 2023).

Η Météo-France αναπτύσσει μοντέλα πρόγνωσης του καιρού μόλις από τις αρχές της δεκαετίας του 1970 και για προσομοιώσεις του κλίματος στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Από τα τέλη της δεκαετίας του 1990 συμμετέχει σε δραστηριότητες εποχικών προγνώσεων. Τα συστήματα εποχικής πρόγνωσης εξελίσσονται διαρκώς σε νέες εκδόσεις, περιλαμβάνοντας τροποποιήσεις διαφόρων υπο-μοντέλων και συνθηκών αρχικοποίησης. Το σύστημα εποχικής πρόγνωσης ενημερώνεται κάθε 3-4 χρόνια (alaingradot 2017).

Η πρώτη εποχική πρόγνωση του συστήματος Météo-France System 6 εκδόθηκε το Μάρτιο του 2017. Είναι ένα σύστημα που χρησιμοποίησε ένα συνδυασμό δυναμικών και στατιστικών τεχνικών για τη δημιουργία προγνώσεων για διάφορες παραμέτρους καιρού και ένα στοχαστικό σχήμα που λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα από την αρχικοποίηση του μοντέλου. Εκτελείτε σε 51 μεμονωμένους υπολογισμούς (πρόγνωση πολλαπλού δείγματος-ensemble), μια φορά το μηνά με ορίζοντα έως 7 μήνες (alaingradot 2017).

Στο **Πίνακα 2.3** φαίνονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του συστήματος MFS6.

Météo-France System 6 (MFS6)	
Atmospheric model	Arpege V6.2.5

Land Surface model	Surfex V8.1
River routing model	TRIP
Ocean model	Nemo V3.6
Sea-ice model	Gelato V6

Πίνακας 2.3: Εκδόσεις των μοντέλων ατμόσφαιρας, ωκεανών, επιφάνειας και μοντέλο θαλάσσιου πάγου κλπ. του MFS6 (alaingradot 2017).

2.2 Δεδομένα Παρατήρησης

Τα δεδομένα παρατήρησης είναι απαραίτητα για την αξιολόγηση της εποχικής πρόγνωσης, όχι μόνο για την βαθμονόμηση των συστημάτων, αλλά και την σύγκριση μεταξύ τους με στόχο την ανίχνευση σφαλμάτων και διαφορών και τη βελτίωση τους.

2.2.1 Δεδομένα ERA5 παγκόσμια επανα-ανάλυσης

Τα δεδομένα ERA5 παγκόσμιας επανα-ανάλυσης (ERA5 global reanalysis) είναι η πέμπτη γενιά ατμοσφαιρικών αναλύσεων του ECMWF για το παγκόσμιο κλίμα που καλύπτει την περίοδο από τον Ιανουάριο του 1940 έως σήμερα. Τα δεδομένα παρατήρησης ERA5 διατίθενται ελεύθερα από την υπηρεσία Copernicus Climate Change Service (C3S) του ECMWF, σε κανονικά πλέγματα γεωγραφικού πλάτους-μήκους με ανάλυση $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$. Παρέχει ωριαίες εκτιμήσεις για μεγάλο αριθμό ατμοσφαιρικών, χερσαίων και ωκεάνιων μεταβλητών. Η ανάλυση συνδυάζει τα δεδομένα των μοντέλων με παρατηρήσεις από όλο τον κόσμο σε ένα παγκόσμιο, χρονικά πλήρες και χωρικά συνεχές σύνολο δεδομένων.

Στο πλαίσιο της υπηρεσίας Κλιματικής Αλλαγής Copernicus (C3S), η ECMWF παράγει τα δεδομένα ERA5, η οποία ενσωματώνει μια λεπτομερή καταγραφή της ατμόσφαιρας, της επιφάνειας της γης και της ωκεάνιας κυκλοφορίας σε παγκόσμια κλίμακα από το 1950 και μετά. Βασίζονται στο ολοκληρωμένο σύστημα πρόγνωσης (IFS) Cy41r2 το οποίο τέθηκε σε λειτουργία το 2016. Εκτός από μια σημαντικά βελτιωμένη οριζόντια χωρική ανάλυση 31km, σε σύγκριση με την 80km για τον προκάτοχο ERA-Interim, τα ERA5 έχουν ωριαίο χρονικό βήμα καθ' όλη τη περίοδο επανα-ανάλυσης (Hersbach et al. 2020).

2.2.2 Δεδομένα CHIRPS

Η ομάδα Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station data (CHIRPS) ανέπτυξε ένα παγκόσμιο σύνολο δεδομένων βροχοπτώωσης που καλύπτουν μια περίοδο άνω των 30 ετών. Ξεκινώντας από το 1981 έως σήμερα,

τα δεδομένα CHIRPS ενσωματώνουν δορυφορικές εικόνες με δεδομένα σταθμών για τη δημιουργία χρονοσειρών βροχόπτωσης σε πλεγματική μορφή (Dinku et al. 2018).

Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της βάσης δεδομένων σχετικά με τις υφιστάμενες είναι η υψηλή χωρική ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων σε $0,05^\circ$, καθώς η τυπική διακριτοποίηση αντίστοιχων δεδομένων βροχόπτωσης είναι της τάξης της ανάλυσης $0,5^\circ$ ή αδρομερέστερη (Tapiador et al. 2012), ενώ ελάχιστες από αυτές, όπως η 3B43 του TRMM (Huffman et al. 2007) και η E-OBS (Haylock et al. 2008) έχουν ανάλυση $0,25^\circ$.

Τα δεδομένα CHIRPS είναι διαθέσιμα στο Climate Hazards Center-UC SANTA BARBARA σε κανονικά πλέγματα γεωγραφικού πλάτους-μήκους με ανάλυση $0,05^\circ \times 0,05^\circ$.

2.3 Εργαλείο CSTools

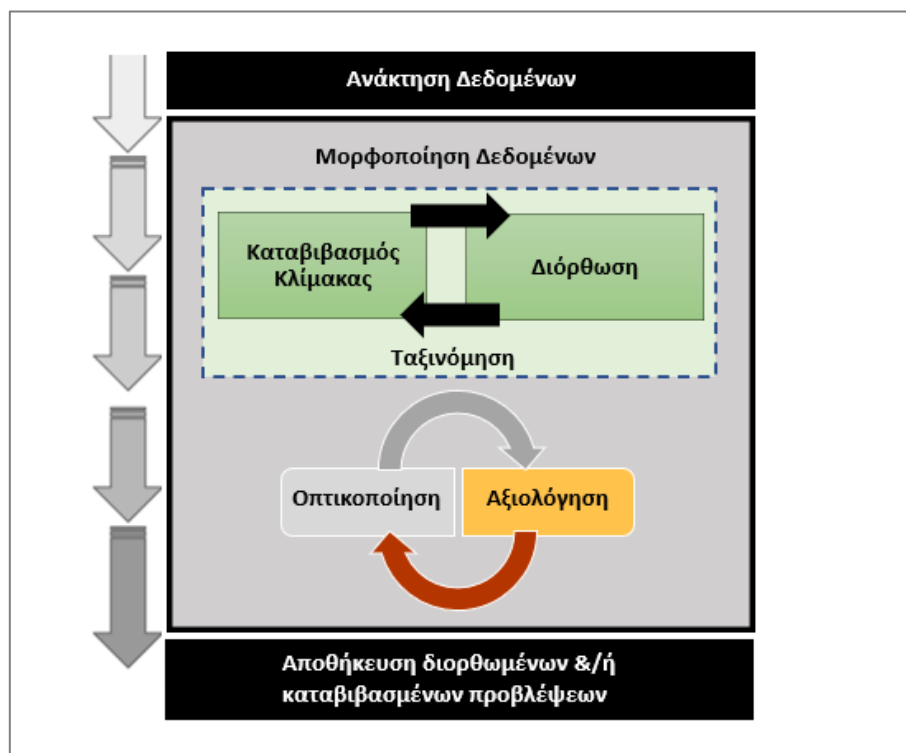
Παρά την επάρκεια των υφιστάμενων δεδομένων κλιματικής πρόγνωσης εποχικής κλίμακας, μόνο ένα μικρό μέρος αξιοποιείται αποτελεσματικά σε τομεακές εφαρμογές. Μια κύρια αιτία αυτού είναι η έλλειψη ολοκληρωμένων εργαλείων που επιτρέπουν το μετασχηματισμό των δεδομένων σε χρήσιμες πληροφορίες για το κλίμα. Αυτό το εμπόδιο αντιμετωπίζεται μέσω της ανάπτυξης του Climate Services Toolbox, CTools, (Εργαλειοθήκη Κλιματικών Υπηρεσιών), ενός πακέτου R. Είναι μια εύχρηστη εργαλειοθήκη που έχει σχεδιαστεί και αναπτύχθηκε για να αξιολογεί και να βελτιώνει την ποιότητα των κλιματικών προβλέψεων για εποχικές έως πολυετείς κλίμακες (Pérez-Zanón et al. 2022).

2.3.1 Δυνατότητες εργαλείου CTools

- **Συλλογή δεδομένων, επιμέλεια και ομογενοποίηση:** Περιλαμβάνει τη συλλογή δεδομένων και την αποθήκευση. Η πολυπλοκότητα αυτού του βήματος μπορεί να είναι υψηλή, ιδιαίτερα εάν οι προελεύσεις δεδομένων δεν ακολουθούν τα πρότυπα.
- **Ανάκτηση και μορφοποίηση δεδομένων:** Αναφέρεται στη μεταφόρτωση κλιματικών δεδομένων από αρχεία που είναι αποθηκευμένα σε τοπικά ή απομακρυσμένης πρόσβασης από συγκεκριμένους οργανισμούς (π.χ. μετεωρολογικούς). Πρέπει να αντιμετωπιστούν μικρές διαφορές στα αρχεία των δεδομένων για την αποθήκευση των αντίστοιχων συνόλων δεδομένων και συχνά απαιτούνται μέθοδοι επεξεργασίας χωρικών και χρονικών δεδομένων, όπως μέθοδοι χωρικής παρεμβολής.
- **Μέθοδοι διόρθωσης για τη βαθμονόμηση πρόγνωσης:** Η βαθμονόμηση είναι απαραίτητη για τη διόρθωση συστηματικών σφαλμάτων, την αποκάλυψη οποιουδήποτε προγνωστικού σήματος και

την προσαρμογή των προγνώσεων στις στατιστικές ιδιότητες παρατήρησης, προκειμένου να ενσωματωθούν στα μοντέλα.

- **Μέθοδοι ταξινόμησης για συνδυασμό πολλαπλών προγνωστικών μοντέλων ή επιλογή σεναρίου:** Ο συνδυασμός πολλαπλών συστημάτων πρόγνωσης επιτρέπει να διευρυνθεί σημαντικά η ποικιλομορφία των πιθανών καιρικών καταστάσεων (Hemri et al. 2020), τα σφάλματα αντισταθμίζονται εν μέρει και υπάρχει αύξηση της συνέπειας και της αξιοπιστίας (Francisco J. Doblas-Reyes, Hagedorn, and Palmer 2005).
- **Καταβιβασμός κλίμακας:** Τα συστήματα πρόγνωσης λόγω υπολογιστικών περιορισμών, παρέχουν συνήθως χωρικά αδρομερή (~100 km) πληροφορία εποχικής πρόγνωσης σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι χρήστες, ωστόσο, απαιτούν πληροφορίες σε λεπτότερη, τοπική, κλίμακα. Ως εκ τούτου, οι στατιστικές και στοχαστικές τεχνικές καταβιβασμού κλίμακας χρησιμοποιούνται συνήθως για την εκτέλεση ρεαλιστικών μετασχηματισμών από αδρομερείς σε λεπτομερείς κλίμακες (Douglas Maraun and Widmann 2017, Ramon et al. 2021).
- **Αξιολόγηση προγνωστικής ικανότητας:** Η εκτίμηση της ποιότητας των προβλέψεων είναι απαραίτητη για την κατανόηση των περιορισμών των προσομοιώσεων, τη βελτίωση των υφιστάμενων συστημάτων πρόγνωσης και την παροχή χρήσιμων προϊόντων πρόγνωσης προσαρμοσμένων σε διάφορους τομείς (Merryfield et al. 2020).
- **Οπτικοποίηση:** Υπό την προοπτική παροχής κλιματικών υπηρεσιών, τα εργαλεία οπτικοποίησης είναι απαραίτητα για την απεικόνιση διαφορετικών πτυχών των κλιματικών προγνώσεων.



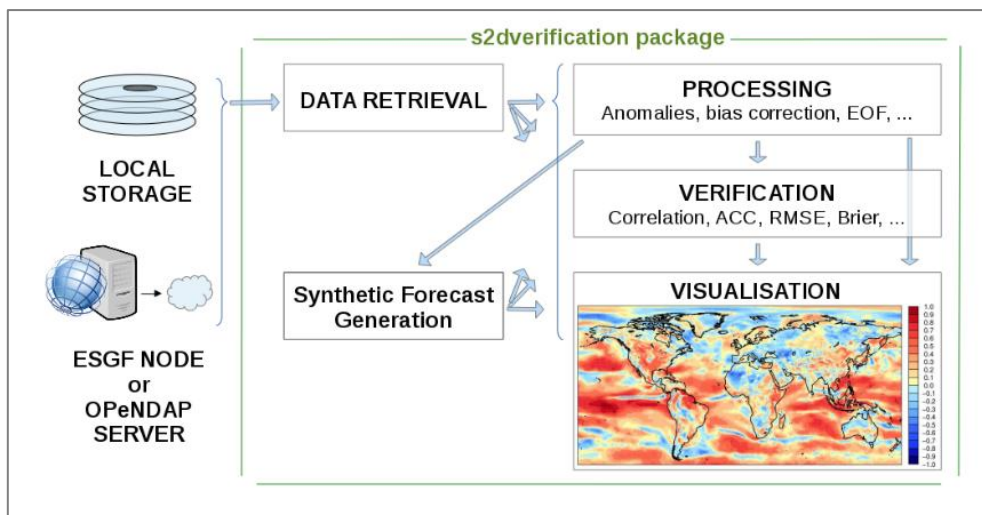
Σχήμα 2.5: Σχήμα της ελέυκτης ροής εργασιών του εργαλείου CStools (από πάνω προς τα κάτω). Κάθε πλαίσιο αντιπροσωπεύει μία κατηγορία λειτουργιών του εργαλείου (Pérez-Zanón et al. 2022).

2.3.2 Συναρτήσεις ανάκτησης και μετασχηματισμού δεδομένων

Το CSTools περιλαμβάνει μια λειτουργία για την ανάκτηση δεδομένων από αρχεία netCDF που ονομάζεται `CST_Load`. Αυτή η συνάρτηση συσχετίζεται με τη συνάρτησης φόρτωσης πλέον `s2dv` (παλιότερα `s2dverification`), η οποία επιτρέπει να φορτώνονται μηνιαία ή ημερήσια δεδομένα πρόγνωσης μαζί με την ημερομηνία που αντιστοιχεί στις παρατηρήσεις (Manubens et al. 2018a). Ακόμη, το CSTools μπορεί να παρεμβάλλει αυτόματα όλα τα δεδομένα σε ένα κοινό πλέγμα εάν είναι απαραίτητο, μειώνοντας έτσι την πολυπλοκότητα για τον χρήστη. Για χρήστες που ανακτούν δεδομένα με άλλα μέσα (π.χ. χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη `ncdf4`, ('CRAN - Package Ncdf4' n.d.)), το πακέτο CSTools περιέχει δύο λειτουργίες για τη μετατροπή δεδομένων σε μορφή `s2dv_cube`. Εάν τα δεδομένα και τα μεταδεδομένα έχουν φορτωθεί σε ξεχωριστά αντικείμενα, μπορούν να συγχωνευθούν σε ένα αντικείμενο `s2dv_cube` με τη συνάρτηση `s2dv_cube`.

Μία από τις δυνατότητες του CSTools είναι να δημιουργήσει ένα νέο σύνολο δεδομένων αφού, για παράδειγμα, τα δεδομένα έχουν μειωθεί ή/και βαθμονομηθεί. Σε αυτήν την περίπτωση, ο χρήστης μπορεί να χρειαστεί να αποθηκεύσει το νέο σύνολο δεδομένων σε αρχεία που θα μοιραστούν μεταξύ άλλων χρηστών ή της κοινότητάς του. Επομένως, το πακέτο συνοδεύεται από μια συνάρτηση αποθήκευσης που ονομάζεται `CST_SaveExp`, η οποία δημιουργεί αρχεία netCDF σε έναν κατάλογο που έχει οριστεί από τον χρήστη και ο οποίος μπορεί να φορτωθεί ξανά με τη συνάρτηση `CST_Load`. Επιπλέον, τα βασικά κλιματολογικά βήματα των υπολογιστικών ανωμαλιών μπορούν να γίνουν με το `CST_Anomaly`, το οποίο είναι μια συνάρτηση των μεθόδων `s2dverification` που επιτρέπει επίσης τον υπολογισμό ομαλοποιημένων κλιματολογιών.

Οι συναρτήσεις `CST_MergeDims` και `CST_SplitDims` παρέχουν πρόσθετη ευελιξία για το χειρισμό αντικειμένων `s2dv_cube`. Για παράδειγμα, απαιτείται συνήθως ο διαχωρισμός της χρονικής διάστασης των ετήσιων δεδομένων σε δύο διαστάσεις, με τη μία να προσδιορίζει την εποχή και την άλλη τον μήνα αυτής της εποχής.



Σχήμα 2.6: Οι βασικές ενότητες του πακέτου *s2dverification* (Manubens et al. 2018b).

Στο **Σχήμα 2.6** απεικονίζονται οι βασικές ενότητες του πακέτου λογισμικού *s2dverification*. Η ενότητα ανάκτησης δεδομένων συγκεντρώνει τα δεδομένα πρόβλεψης και αναφοράς που απαιτούνται για την ανάλυση είτε από τοπική αποθήκευση είτε από απομακρυσμένους διακομιστές, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να διαβιβαστούν απευθείας σε οποιαδήποτε από τις άλλες ενότητες. Τα δεδομένα μπορούν επίσης να παραχθούν συνθετικά από την ενότητα δημιουργίας συνθετικών προβλέψεων. Η μονάδα επεξεργασίας προεπεξεργάζεται ή εκτελεί προκαταρκτικές αναλύσεις των δεδομένων, όπως ο υπολογισμός των διορθωμένων προβλέψεων ή των τρόπων μεταβλητότητας, η μονάδα επαλήθευσης υπολογίζει ντετερμινιστικές ή πιθανολογικές βαθμολογίες ή βαθμολογίες δεξιοτήτων- τα δεδομένα από οποιαδήποτε από αυτές τις μονάδες μπορούν να απεικονιστούν με τη μονάδα απεικόνισης, η οποία παράγει γραφικές παραστάσεις είτε χρονοσειρών, είτε χαρτών είτε κινούμενων εικόνων χαρτών (Manubens et al. 2018b).

2.3.3 Βαθμονόμηση

Οι μέθοδοι προσαρμογής-διόρθωσης μπορούν να βελτιώσουν την ποιότητα των προσομοιώσεων, καθώς μειώνουν τα συστηματικά σφάλματα που υπάρχουν στην πρόγνωση λόγω ελλείψεων του μοντέλου. Η περιοδικότητα των τύπων μεταβλητότητας, δηλαδή χωροχρονικά μοτίβα που τείνουν να επαναλαμβάνονται στα παρατηρούμενα αρχεία, μπορεί να αξιοποιηθούν για τη βελτίωση της ικανότητας πρόγνωσης.

Η βαθμονόμηση μπορεί να θεωρηθεί ως ένας τρόπος επεξεργασίας προγνώσεων με μέσες στατιστικές ιδιότητες παρόμοιες με αυτές ενός συνόλου δεδομένων αναφοράς. Το *CST_Calibration* εκτελεί τη διόρθωση στις προσομοιώσεις των συστημάτων πρόγνωσης χρησιμοποιώντας πέντε διαφορετικές μεθοδολογίες που εφαρμόζονται μεμονωμένα σε κάθε δείγμα (member), όπου κάθε μεθοδολογία μπορεί να προσαρμόσει μία ή περισσότερες

από τις στατιστικές ιδιότητες των προγνώσεων. Η επιλογή της πιο κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από τις ανάγκες του χρήστη.

Η μέθοδος "μεροληψίας (bias)" διορθώνει μόνο τη μέση απόκλιση και η μέθοδος "enmos" εφαρμόζει μια τεχνική πληθωρισμού διακύμανσης για να εξασφαλίσει τη διόρθωση του μέσου όρου και της αντιστοιχίας της διακύμανσης μεταξύ προγνώσεων και παρατηρήσεων (B. Van Schaeybroeck and Vannitsem 2011). Οι μέθοδοι βαθμονόμησης συνόλου "mse_min" και "crps_min" διορθώνουν την απόκλιση και τη συνολική διακύμανση πρόγνωσης όπως περιγράφεται στους (Hagedorn, Doblas-Reyes, and Palmer 2005 και Van Schaeybroeck and Vannitsem 2015, αντίστοιχα. Ενώ η μέθοδος mse_min ελαχιστοποιεί ένα περιορισμένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα χρησιμοποιώντας τρεις παραμέτρους, η μέθοδος crps_min διαθέτει τέσσερις παραμέτρους και ελαχιστοποιεί τη βαθμολογία συνεχούς κατάταξης πιθανότητας (CRPS). Η μέθοδος "βασισμένη σε rpc" προσαρμόζει τη διακύμανση πρόγνωσης για να διασφαλίσει ότι ο λόγος των προβλέψιμων στοιχείων (RPC) είναι ίσος με τη μονάδα (Eade et al. 2014).

2.3.4 Μέθοδοι καταβιβασμού κλίμακας

Ο καταβιβασμός της κλίμακας έχει σχεδιαστεί για να αυξάνει την χωρική ανάλυση ενός συνόλου δεδομένων. Στην επιχειρησιακή εποχική πρόγνωση, ο καταβιβασμός της κλίμακας είναι ένα θεμελιώδες βήμα για τη μετατροπή των προσομοιώσεων κλίματος από την αρχική ανάλυση τους στην λεπτότερη ανάλυση που απαιτείται από πολλούς τελικούς χρήστες (D. Maraun et al. 2010)(Rössler et al. 2019).

Το εργαλείο CSTools περιέχει πέντε διαφορετικές μεθοδολογίες καταβιβασμού κλίμακας(CST_Analogs,CST_RainFARM,CST_RFTemp,CST_AdamontQQcor, CST_AnalogsPredictor) που βασίζονται σε αναλογικές τεχνικές, στοχαστικές προσομοιώσεις ή παλινδρόμηση.

2.3.4.1 CST_RFTemp

Το CST_RFTemp εφαρμόζει μια απλή διόρθωση ρυθμού λήξης σε ένα πεδίο θερμοκρασίας κοντά στην επιφάνεια για να ληφθούν υπόψη οι αλλαγές στην ορογραφία μεταξύ ενός πλέγματος δεδομένων χαμηλής και υψηλής ανάλυσης('Medscope (689029) Milestone M3.2', n.d.).

2.3.4.2 CST_RainFARM

Το CST_RainFARM εφαρμόζει μια τεχνική στοχαστικής μείωσης κλίμακας και αντιπροσωπεύει τη λεγόμενη γεννήτρια καιρού πλήρους πεδίου. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η συνάρτηση δημιουργεί συνθετικά πεδία κατακρήμνισης υψηλής ανάλυσης, των οποίων οι στατιστικές ιδιότητες είναι συνεπείς με τις στατιστικές αδρομερούς κλίμακας της παρατηρούμενης βροχόπτωσης, διατηρώντας παράλληλα τις ιδιότητες του πεδίου υετού μεγάλης κλίμακας. Η

μέθοδος που αναπτύχθηκε αρχικά έχει προσαρμοστεί για τη μείωση της κλίμακας σε χρονικές κλίμακες από τους (D'Onofrio et al. 2014) και βελτιώθηκε πρόσφατα για περιοχές με πολύπλοκη ορογραφία, για τα οποία τα πεδία υψηλής ανάλυσης που παράγονται από τη συνάρτηση RainFARM διορθώνονται χρησιμοποιώντας βάρη που προέρχονται από μια κλιματολογία βροχοπτώσεων υψηλής ανάλυσης (Terzago, Palazzi, and Von Hardenberg 2018a). Αυτή η μεθοδολογία βασίζεται στη συνάρτηση για τον υπολογισμό βαρών από κλιματολογίες υψηλής ανάλυσης (CST_RFWeights).

2.3.5 Οπτικοποίηση

Μερικές από τις πιο απαιτούμενες λειτουργικότητες στις κλιματικές υπηρεσίες είναι τα εργαλεία οπτικοποίησης δεδομένων που επιτρέπουν την παρουσίαση μεγάλου όγκου πληροφοριών με διαισθητικό τρόπο. Όλες οι λειτουργίες οπτικοποίησης στο πακέτο CSTools μπορούν να προσαρμοστούν τροποποιώντας χρώματα, τίτλους, μεγέθη κ.λπ., και είναι δυνατή η αποθήκευση τους σε αρχεία σε διαφορετικές μορφές (.ps, .eps, .png, .pdf, κ.λπ.).

Το PlotCombinedMap συνδυάζει πολλαπλά δισδιάστατα σύνολα δεδομένων σε έναν ενιαίο χάρτη που βασίζεται σε μια συνάρτηση απόφασης. Με άλλα λόγια, παρέχονται αρκετοί χάρτες ως είσοδος και για κάθε χάρτη, η συνάρτηση δημιουργεί ένα υπόμνημα χρώματος. Μια συνάρτηση απόφασης χρησιμοποιείται σε κάθε σημείο πλέγματος για να επιλέξει την τιμή που θα εμφανιστεί, διατηρώντας έτσι τις πληροφορίες σε ποιον χάρτη ανήκει στη διαδικασία. Για παράδειγμα, η συνέπεια των διαφόρων μοντέλων θα μπορούσε να συγκρίνει για μια περιοχή με σκοπό οπτικοποιηθεί ποιο είναι το καλύτερο μοντέλο σε επίπεδο πλέγματος για την εκάστοτε περιοχή (Mishra, Prodhomme, and Guemas 2019a). Άλλες εφαρμογές, όπως η σύγκριση πολλαπλών μεταβλητών, είναι επίσης δυνατές.

Το PlotMostLikelyQuantileMap επιτρέπει την οπτικοποίηση διαφορετικών πιθανοτήτων. Λαμβάνει ως κύρια είσοδο (μέσω της παραμέτρου "probs") μια συλλογή από χάρτες γεωγραφικού μήκους-πλάτους, ο καθένας από τους οποίους περιέχει τις πιθανότητες (από 0 έως 1) των διαφορετικών κελιών πλέγματος που ανήκουν σε μια κατηγορία, δηλαδή terciles, quantiles. Η συνάρτηση σχεδιάζει την πιθανότητα για την κατηγορία με τη μέγιστη πιθανότητα για κάθε σημείο του πλέγματος.

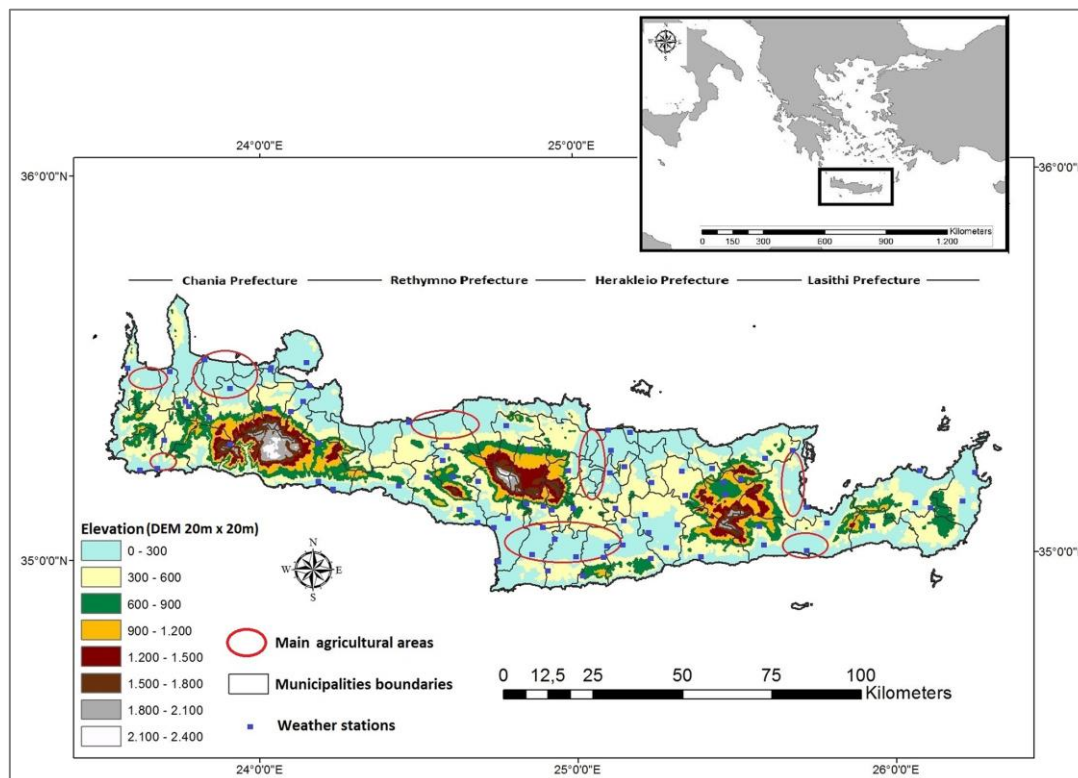
3 Δεδομένα & Μεθοδολογία

3.1 Περιοχή Μελέτης

3.1.1 Γεωγραφικά & Μορφολογικά Χαρακτηριστικά

Η Κρήτη είναι το μεγαλύτερο νησί της Ελλάδας και βρίσκεται στη νοτιότερη περιοχή της χώρας. Είναι το 5^ο μεγαλύτερο νησί στη Μεσόγειο, με έκταση 8265km² και καλύπτει σχεδόν το 6,3% της επιφάνειας της χώρας (Koutroulis et al. 2013). Το νησί χωρίζεται σε τέσσερις νομούς από ανατολή προς δύση είναι το Λασιθί (1810 km²), το Ηράκλειο (2626 km²), το Ρέθυμνο (1487 km²) και τα Χανιά (2342 km²) (Malagò et al. 2016).

Όσο αφορά τη μορφολογία του νησιού, οι τρεις κύριοι ορεινοί όγκοι που εκτείνονται από δυτικά προς ανατολικά είναι τα Λευκά Όρη στα δυτικά (2453 m), το Όρος Ίδης ή Ψηλορείτης (2456 m) στο κέντρο και η Δίκτη (2148 m) στα ανατολικά (Malagò et al. 2016), στις παρενθέσεις αναφέρεται το υψόμετρο (Χάρτη 3.1).



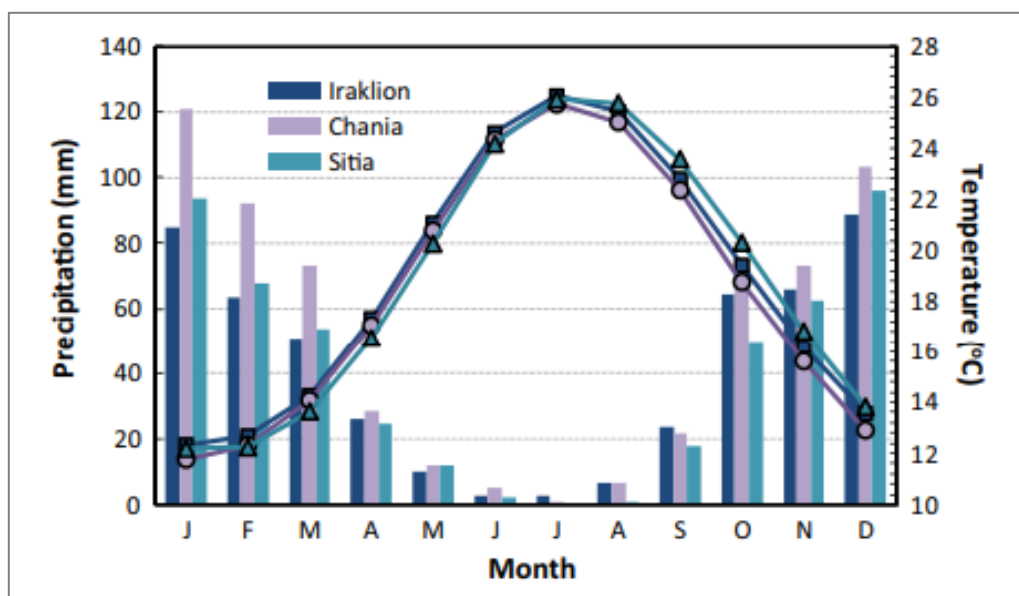
Χάρτης 3.1: Υψομετρικός χάρτης της Κρήτης με τις θέσεις των κύριων γεωργικών περιοχών του νησιού (κόκκινες ελλείψεις). Οι μετεωρολογικοί σταθμοί σημειώνονται με μπλε τετράγωνα (Morianou et al. 2018).

3.1.2 Κλιματολογία Περιοχής

Το κλίμα είναι εύκρατο μεσογειακό, με θερμά και ξηρά καλοκαίρια και ψυχρούς χειμώνες. Η μέση βροχόπτωση του νησιού είναι 878 mm/year. Στα ανατολικά ανέρχεται στα 440 mm/year ενώ στο δυτικό κομμάτι 2000 mm/year (Grillakis et al. 2022). Επιπλέον, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.1**, η ετήσια βροχόπτωση χωρίζεται σε υγρή και ξηρή περίοδο, η πρώτη διαρκεί από τον Οκτώβριο έως τον Μάρτιο και η δεύτερη από τον Απρίλιο έως τον Σεπτέμβριο.

Όσο αφορά τη θερμοκρασία, τα κύματα καύσωνα στις πεδιάδες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού μπορεί να είναι μακράς διάρκειας, επηρεαζόμενα από τους νότιους ανέμους που πνέουν από την Αφρική. Ακόμα, το νότιο τμήμα του νησιού είναι θερμότερο από το βόρειο και θεωρείται το θερμότερο τμήμα της Ελλάδας (Chartzoulakis et al. 2001). Ο Ιούλιος και ο Αύγουστος είναι οι θερμότεροι μήνες και ο Ιανουάριος είναι ο πιο ψυχρός μήνας του έτους, όπως φαίνεται και από το **Σχήμα 3.1**. Το καλοκαίρι η μέση θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 15-30°C με μέγιστη τιμή 40°C και το χειμώνα μεταξύ 10-15°C (Tzanakakis et al. 2020).

Επίσης, η ιδιαίτερη μορφολογική ποικιλομορφία της Κρήτης έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη αξιοσημείωτων κλιματολογικών διαφορών κατά τόπους.



Σχήμα 3.1: Μέση θερμοκρασία (γραμμές) και μέση βροχόπτωση (μπάρες) του Ηρακλείου, των Χανίων και της Σητείας της περιόδου 1955-2010. Στοιχεία από την Ελληνική Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Markonis et al. 2016).

3.1.3 Δραστηριότητες Περιοχής

Οι κυρίες δραστηριότητες στην περιοχή είναι η γεωργία και ο τουρισμός (Andriotis 2006). Η διαχείριση των υδάτων του νησιού αφορά και τους δυο τομείς είτε άμεσα είτε έμμεσα. Στο **Χάρτη 3.1** απεικονίζονται οι κύριες γεωργικές περιοχές και οι μετεωρολογικοί σταθμοί του νησιού.

Η κύρια χρήση νερού στην Κρήτη είναι στην άρδευση για τη γεωργία με ποσοστό 84,5% της συνολικής κατανάλωσης, ενώ η οικιακή χρήση είναι 12% και η βιομηχανική χρήση μόνο 3,5% κυρίως για ελαιοτριβεία, κτηνοτροφία (Chartzoulakis, Paranychanakis, and Angelakis 2001). Ακόμα, η γεωργία έχει άμεση σχέση με τη κλιματολογία της περιοχής και ένα ακραίο φαινόμενο, όπως ένας καύσωνας ή μια περίοδος λειψυδρίας, μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες για τις καλλιέργειες. Η εφαρμογή της εποχικής πρόγνωσης δύναται να παράσχει χρήσιμη πληροφορία σχετικά με τις μέσες αναμενόμενες κλιματικές συνθήκες αρκετές εβδομάδες έως και μήνες πριν, δίνοντας περιθώρια σχεδιασμού και προετοιμασίας, ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητες επιπτώσεις.

Ένας άλλος τομέας που σχετίζεται με τη χρήση του νερού είναι ο τουρισμός, μια σημαντική οικονομική δραστηριότητα στην Κρήτη, η οποία εξακολουθεί να αυξάνεται σημαντικά. Η τουριστική ζήτηση νερού μπορεί να δημιουργήσει μεγάλα προβλήματα βιωσιμότητας, κυρίως σε εκείνες τις περιοχές όπου το νερό είναι σπάνιο, όπως συμβαίνει στους περισσότερους παράκτιους και νησιωτικούς προορισμούς όπου συγκεντρώνεται μεγάλο μέρος του παγκόσμιου τουρισμού (Deyà Tortella and Tirado 2011). Δημιουργούνται κατ' επέκτασης απαιτήσεις μεγάλων ποσοτήτων ύδρευσης, με μέγιστη ζήτηση κατά τη διάρκεια της υψηλής περιόδου και πλεονάζουσα κατά τη χαμηλή περίοδο. Η ζήτηση αυτή συμπίπτει χρονικά με την απαίτηση άρδευσης των καλλιεργειών μεγεθύνοντας το πρόβλημα της επάρκειας υδατικών αποθεμάτων.

Περίπου το 70-80% των ετήσιων βροχοπτώσεων λαμβάνει χώρα σε τρεις έως τέσσερις μήνες, ενώ τα καλοκαίρια είναι συνήθως μακρά και ξηρά. Η κατάσταση αυτή επιδεινώνεται περαιτέρω από την εποχική και περιφερειακή διακύμανση της ζήτησης νερού. Τόσο η γεωργία όσο και ο τουρισμός απαιτούν αυξημένες ποσότητες στα τέλη της άνοιξης, το καλοκαίρι και στις αρχές του φθινοπώρου, όταν το νερό είναι σε έλλειψη. Ακόμα, η κύρια πηγή νερού για το νησί είναι τα υπόγεια ύδατα. Ήδη από τα τέλη του προηγούμενου αιώνα (Lambrakis 1998) είχε τονιστεί το πρόβλημα της εξάντλησης του νερού και ο αυξανόμενος αριθμός γεωτρήσεων τους παράκτιους υδροφόρους που υποβαθμίζουν την ποιότητα του νερού, λόγω της αλατότητας και της νιτρορύπανσης. Επομένως είναι επιτακτική ανάγκη η βιώσιμη διαχείριση των υδάτων και η εποχική πρόγνωση μπορεί να δώσει λύσεις σε κάποια από τα ζητήματα διαχείρισης.

3.2 Δεδομένα

Τα δεδομένα των συστημάτων εποχικής πρόγνωσης ανακτώνται από δυο πηγές:

- Climate Data store του Copernicus
(<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset>)
- MEDSCOPE
(<http://wilma.to.isac.cnr.it/MEDSCOPE/downscaling/>).

Αρχικά για τη διαδικασία αξιολόγηση συνέπειας εποχικών προγνώσεων και τη βαθμονόμηση τους χρησιμοποιήθηκαν ημερήσια πειραματικά δεδομένα θερμοκρασίας και βροχόπτωσης από δυο συστήματα εποχικής πρόγνωσης, το ECMWF System 5 (ECMWF5) και το Météo-France System 6 (MF6) από το MEDSCOPE με ανάλυση 0,25°. Οι ημερομηνίες έκδοσης προγνώσεων είναι δυο η 1^η Μαΐου και η 1^η Νοεμβρίου, ώστε να αξιολογηθούν δυο προγνωστικές περίοδοι Μαΐου-Νοεμβρίου και Νοεμβρίου-Μαΐου αντίστοιχα για την περίοδο 1993-2016.

Για τον καταβιβασμό της κλίμακας χρησιμοποιήθηκαν, ως παρατηρήσεις, τα ημερήσια πειραματικά δεδομένα θερμοκρασίας και βροχόπτωσης του συστήματος ECMWF5 από το Climate Data store του Copernicus με ανάλυση 1°. Για τη θερμοκρασία σκοπός είναι η καλύτερη πληροφόρηση για το καλοκαίρι του 2003, το πιο θερμό της περιόδου 1993-2016, με ημερομηνία έκδοσης πρόγνωσης 1^η Μαΐου. Ακόμα, για τη βροχόπτωση ημερομηνία έκδοσης πρόγνωσης είναι η 1^η Αυγούστου, με σκοπό τη καλύτερη πληροφόρηση για το φθινόπωρο του 2002, το πιο υγρό φθινόπωρο της περιόδου 1993-2016. Αυτές οι δυο περίοδοι βρέθηκαν από την επεξεργασία των δεδομένων επανα-ανάλυσης ERA5.

Για την εφαρμογή επιχειρησιακής πιθανολογικής πρόγνωσης χρησιμοποιήθηκαν τα ημερήσια πειραματικά δεδομένα θερμοκρασίας και βροχόπτωσης του συστήματος ECMWF5 από το Climate Data store του Copernicus με ανάλυση 1°. Η τελευταία ημερομηνία έκδοσης πρόγνωσης είναι η 1^η Οκτώβριου 2022, με βάση την οποία εκτιμήθηκε η πρόγνωση για το χειμώνα του 2023 (Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος) και στους δυο πρώτους μήνες της άνοιξης (Μάρτιος, Απρίλιος) του 2023.

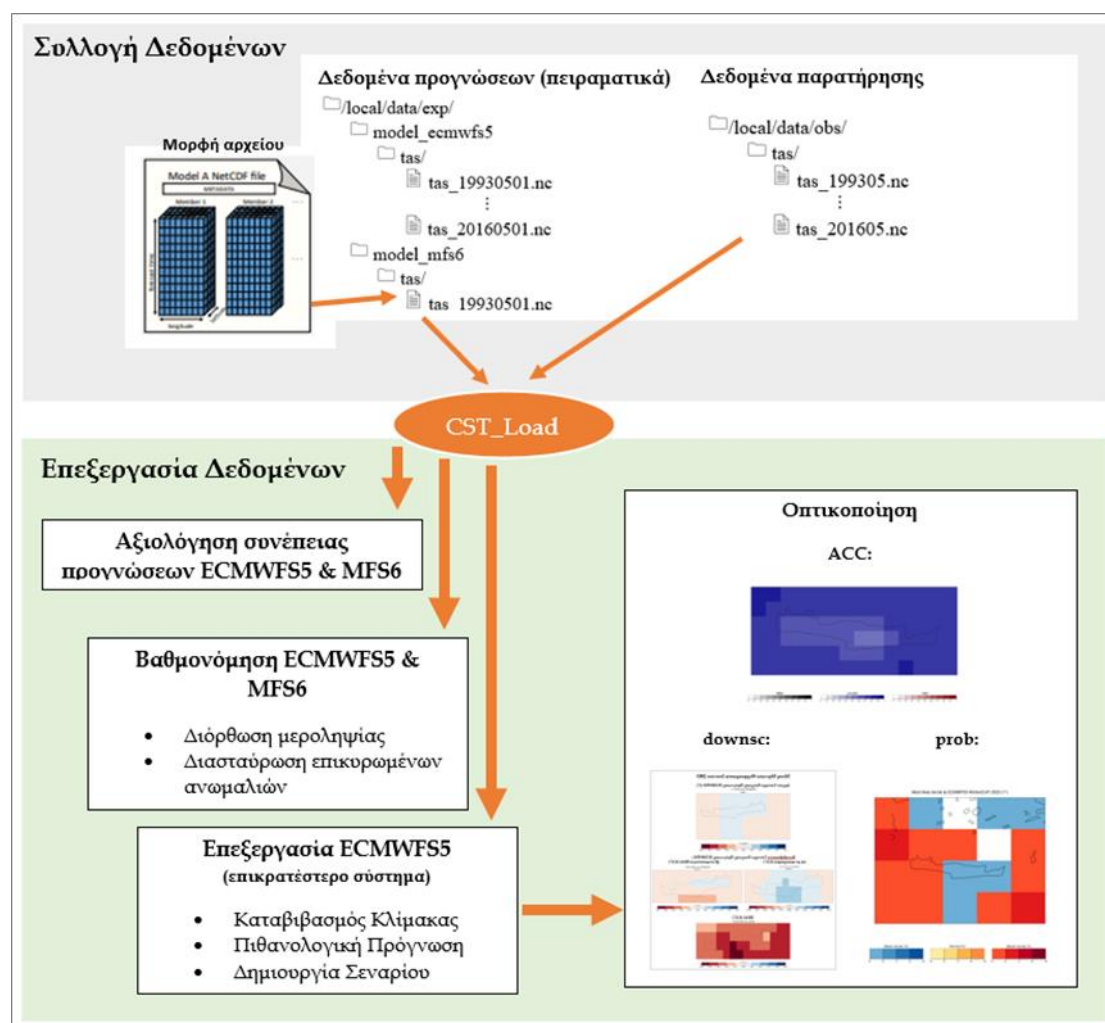
Τα ημερήσια δεδομένα παρατήρησης σε όλες τις περιπτώσεις προέρχονται από τα δεδομένα επανα-ανάλυσης ERA5 με ανάλυση 0,25° για τη θερμοκρασία και για τη βροχόπτωση από το Climate Explorer, διαθέσιμα στη διεύθυνση (<https://climexp.knmi.nl/selectdailyfield2.cgi?id=someone@somewhere>).

Ακόμη, για την περίπτωση του καταβιβασμού κλίμακα της βροχόπτωσης χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα χώρο-χρονικής ανάλυσης CHIRPS για την εύρεση των ορογραφικών βαρών από το Climate Hazards Center-UC Santa Barbara(https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_daily/netcdf/p05/).

Σε όλες τις περιπτώσεις έγιναν οι κατάλληλες μετατροπές μονάδων, ώστε η θερμοκρασία να έχει μονάδες °C και η βροχόπτωση mm. Όλα τα αρχεία είναι σε μορφή netCDF, και έχουν περιορισθεί στο ευρύτερο γεωγραφικό μήκος και πλάτος της Κρήτης.

3.3 Μεθοδολογία

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται η μεθοδολογία επεξεργασίας των δεδομένων με την σειρά που πραγματοποιήθηκε. Αρχικά εξετάστηκε ποιο από τα δυο συστήματα εποχικής πρόγνωσης ECMWF System 5 (ECMWF5) και Météo-France System 6 (MFS6) είναι το πιο συνεπές για την περιοχή μελέτης. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση και ο καταβιβασμός κλίμακας των προγνώσεων. Τέλος δημιουργήθηκαν ορισμένες τρέχουσες πιθανολογικές προγνώσεις και σενάρια. Το Σχήμα 3.2 συνοψίζει τη διαδικασία επεξεργασίας πρωτογενών δεδομένων εποχικών προγνώσεων και τη μετατροπή τους σε χρήσιμη πληροφορία.



Σχήμα 3.2: Ενδεικτικό διάγραμμα επεξεργασίας πρωτογενών - δεδομένων εποχικών προγνώσεων και μετατροπής τους σε χρήσιμη πληροφορία.

3.3.1 Αξιολόγηση Συνέπειας Εποχικών Προγνώσεων

Για την αξιολόγηση της συνέπειας των εποχικών προγνώσεων αναλύθηκαν τα αποτελέσματα από δυο συστήματα εποχικής πρόγνωσης, το ECMWFS5 και το MFS6 διαθέσιμα για τη περίοδο 1993-2016 με ημερομηνίες έκδοσης πρόγνωσης την 1^η Μαΐου και την 1^η Νοεμβρίου. Ως δεδομένα παρατήρησης για σύγκριση και βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα ERA5. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για την επιλογή του καλύτερου συστήματος τόσο για την παράμετρο της θερμοκρασίας όσο και της βροχόπτωσης.

Αρχικά φορτώθηκαν με την συνάρτηση CST_Load τα δεδομένα από τα δυο συστήματα πρόγνωσης καθώς και τα δεδομένα παρατήρησης με τη χρήση των μεταβλητών είτε της θερμοκρασίας (t2m ή tas) είτε της βροχόπτωσης (tp ή prlr). Επίσης καθορίστηκε κοινή πλεγματική χωρική ανάλυση των δεδομένων σε 0,25°.

Για την αξιολόγηση της πιστότητας χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής συσχέτισης ανωμαλιών (Anomaly Correlation Coefficient ,ACC), που είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος δείκτης πιστότητας για την ποιότητα των εποχικών προγνώσεων (Mishra, Prodhomme, and Guemas 2019b).

Ουσιαστικά ο συντελεστής ACC αξιολογεί τον βαθμό γραμμικής αντιστοιχίας μεταξύ των ανωμαλιών της πρόγνωσης και των ανωμαλιών της παρατηρούμενης κλιματικής μεταβλητής σύμφωνα με την εξίσωση:

$$ACC = \frac{\langle (F-\beta)(V-\beta) \rangle}{\sqrt{\langle (F-\beta)^2 \rangle \langle (V-\beta)^2 \rangle}}, \quad (\text{D  qu   1997}) \quad (3.1)$$

Οπού F είναι η πρόγνωση, V η επαλήθευση, β η κλιματολογία και $\langle \dots \rangle$ τελεστής χωρικής επαλήθευσης (spatial average operator).

Ακόμα, ο συντελεστής ACC λαμβάνεται με την εκτέλεση της συνάρτησης CST_MultiMetric, ορίζοντας ως παράμετρο "metric" τη συσχέτιση. Η συνάρτηση περιλαμβάνει επίσης τη δυνατότητα υπολογισμού του συνόλου του μέσου όρου πολλαπλών μοντέλων (MMM). Η απεικόνιση   γινε με τη συνάρτηση PlotCombinedMap.

3.3.2 Βαθμονόμηση Πρόγνωσης

Αρχικά εισήχθησαν τα ίδια δεδομένα με τη μέθοδο που περιγράφεται στην ενότητα 3.3.1 «Αξιολόγηση Συνέπειας Εποχικών Προγνώσεων», δηλαδή τα δυο συστήματα εποχικής πρόγνωσης, το ECMWFS5 και το MFS6 για τη περίοδο 1993-2016 με ημερομηνίες έκδοσης πρόγνωσης την 1^η Μαΐου και την 1^η Νοεμβρίου. Ως δεδομένα παρατήρησης για σύγκριση και βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα ERA5. Στην αρχή εφαρμόστηκε και για τα δυο συστήματα πρόγνωσης η συνάρτηση CST_Calibration με τη μέθοδο 'mse_min', για τη δι  ρθωση του μέσου   ρου του συνόλου, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$X_{c,n}^m = \alpha + \sum_p^P \beta_p \bar{V}_{p,n} + \varepsilon_n^m, \quad (3.2)$$

(Bert Van Schaeybroeck and Vannitsem 2015b)

Όπου $\alpha = \langle X_O \rangle_n - \langle \beta \bar{V} \rangle_n$, $\beta = \sigma_{O\bar{V}}^2 \sigma_{\bar{V}}^{-2}$, με $X_O = (X_{O,1}, \dots, X_{O,N})$ το διάνυσμα όλων των N παρατηρήσεων, $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_P)$ P το διάνυσμα των παραμέτρων παλινδρόμησης και \bar{V} ο πίνακας μεγέθους $P \times N$ που περιέχει όλους τους μέσους προγνωστικούς παράγοντες του συνόλου. Η έκφραση $\langle A \rangle_n$ δηλώνει τη μέση τιμή για όλα τα στοιχεία του διανύσματος N του A . Ο πίνακας συνδιακύμανσης $\sigma_{\bar{V}}^2$ και το διάνυσμα $\sigma_{O\bar{V}}^2$ που περιέχουν τα στοιχεία (τα p_1 και p_2 είναι μεταξύ 1 και P) ορίζονται ως εξής:

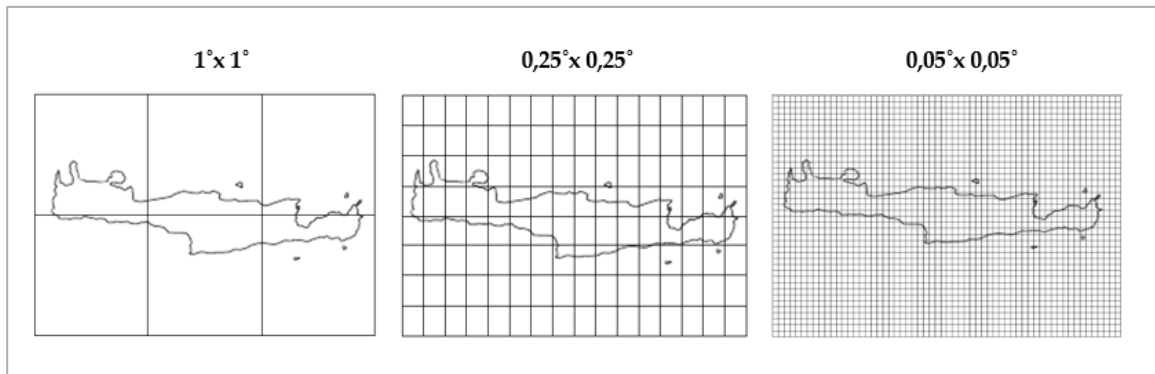
$$\sigma_{\bar{V},p_1,p_2}^2 = \langle (\bar{V}_{p_1,n_1} - \langle V_{p_1} \rangle_n) - (\bar{V}_{p_2,n_1} - \langle V_{p_2} \rangle_n) \rangle_{n_1} \quad (3.3)$$

$$\sigma_{O\bar{V},p_1}^2 = \langle (X_{O,n_1} - \langle X_O \rangle_n) - (\bar{V}_{p_1,n_1} - \langle V_{p_1} \rangle_n) \rangle_{n_1} \quad (3.4)$$

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε η συνάρτηση Bias, ώστε να απομονωθούν οι μέσες τιμές μεροληπτικού σφάλματος από τα αρχικά και βαθμονομημένα συστήματα. Τέλος, με τη συνάρτηση PlotLayout('PlotEquiMap') πραγματοποιήθηκε η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων.

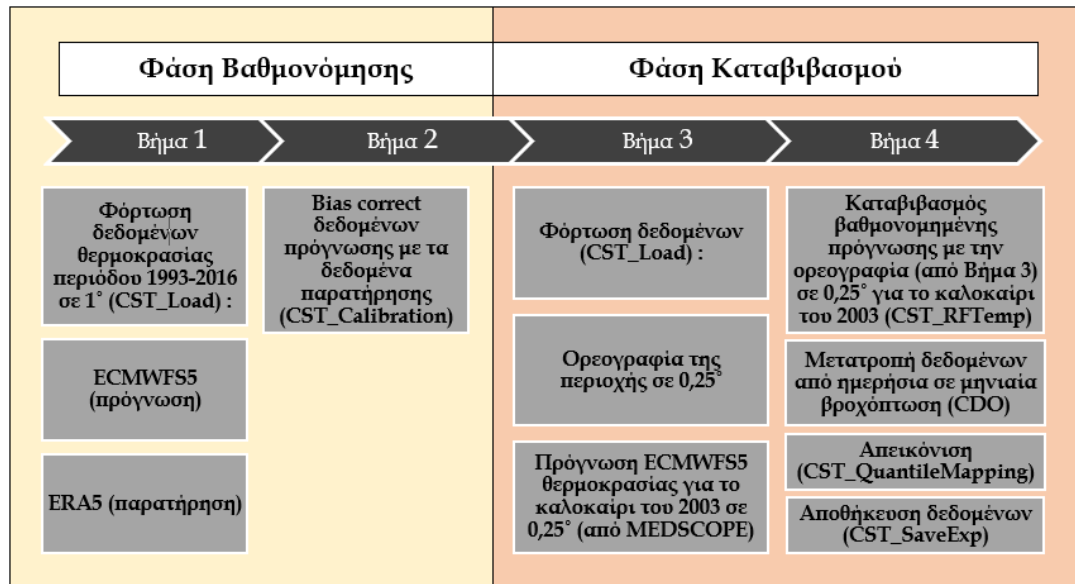
3.3.3 Καταβιβασμός Κλίμακας

Σε αυτό το σημείο πραγματοποιήθηκε ο καταβιβασμός κλίμακας των εποχικών προγνώσεων. Συνήθως τα αποτελέσματα των προγνώσεων είναι σε χωρική κλίμακα της τάξης 1° ($\sim 100\text{km}$), επομένως η πληροφορία πρόγνωσης που μπορεί να αντληθεί για τη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση συγκριτικά με την έκταση της περιοχής μελέτης (Κρήτη) δεν χαρακτηρίζεται από επαρκή χωρική λεπτομέρεια. Επομένως πρέπει να γίνει καταβιβασμός στη κλίμακα, ώστε η πληροφορία που αναπτύσσεται για την περιοχή να διαθέτει κατάλληλη χωρική λεπτομέρεια. Στο **Σχήμα 3.3** απεικονίζονται διαφορετικές αναλύσεις για την ίδια περιοχή μελέτης.



Σχήμα 3.3: Απεικόνιση διαφορετικών αναλύσεων.

3.3.3.1 Θερμοκρασία



Σχήμα 3.4: Βήμα προς βήμα ο καταβιβασμός κλίμακας της θερμοκρασίας από ανάλυση 1° σε 0,25°.

Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την περίοδο 1993 έως 2016 με ημερομηνία έκδοσης των προγνώσεων την 1^η Μαΐου. Ο σκοπός ήταν η καλύτερη πληροφόρηση για το καλοκαίρι του 2003, το οποίο αποτελεί την πιο θερμή περίοδο της χρονικής περιόδου 1993-2016, όπου επικρατούσε καύσωνας σε όλη την Ευρώπη (P. A. Stott, Stone, and Allen 2004).

Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η διαδικασία καταβιβασμού κλίμακας της θερμοκρασίας βήμα προς βήμα. Αρχικά, φορτώθηκαν τα δεδομένα χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση CST_Load. Αυτά περιλάμβαναν τα πειραματικά δεδομένα πρόγνωσης του ECMWF55 και τα δεδομένα παρατήρησης επανα-ανάλυσης ERA5 (Βήμα 1). Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση CST_Calibration και τη μέθοδο μεροληπτικότητας (Βήμα 2). Εφαρμόστηκε η συνάρτηση CST_RTemp, λαμβάνοντας υπόψη την ορογραφία της περιοχής σε πλεγματική χωρική ανάλυση 0,25°, για τον καταβιβασμό κλίμακας της θερμοκρασίας (Βήμα 4), σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$t(x, t) = [T(X, t)]_x + L \cdot (z(x) - \langle z(x) \rangle_x), \quad (3.5)$$

(‘M3.2_high_quality_climate_prediction_v1.2.Pdf - Google Drive’ n.d.)

όπου $T(X)$ είναι το πεδίο θερμοκρασίας αρχικής κλίμακας, $[...]_x$ είναι ένας τελεστής παρεμβολής για τη λεπτομερή κλίμακα x , $\langle \dots \rangle_x$ είναι ένας τελεστής υπολογισμού του μέσου όρου στην αδρομερή κλίμακα, $z(x)$ είναι η ορογραφία και L είναι η θερμοβαθμίδα.

Για το καταβιβασμό κλίμακας με την κλιματολογία της περιοχής σύμφωνα με το MEDSCOPE εφαρμόστηκε η παρακάτω εξίσωση:

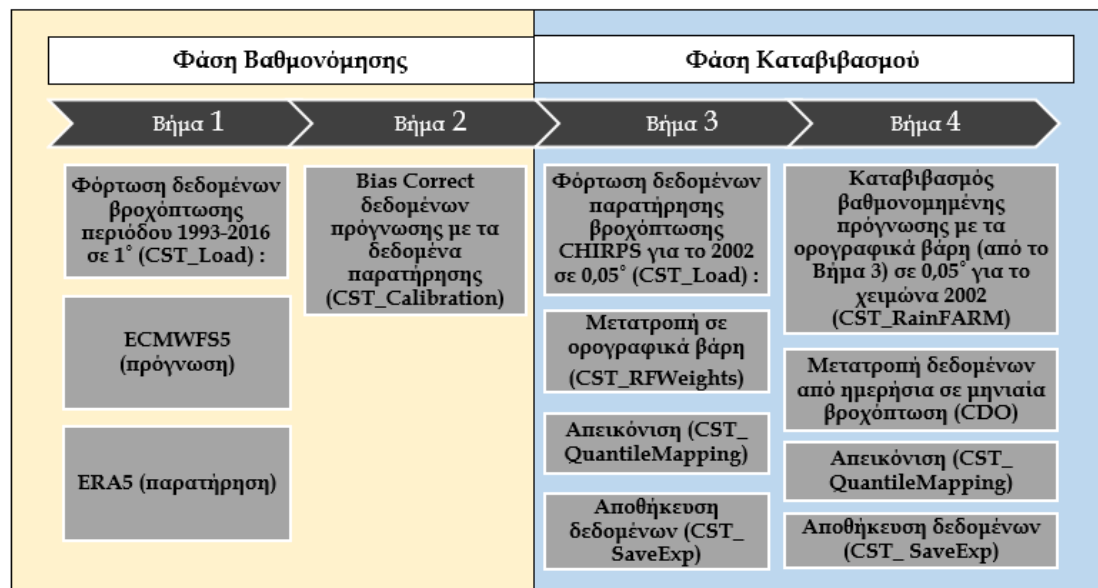
$$t(x, t) = [(X, t)]_x + \overline{e(x, t)} - \overline{[T(X, t)]_x}, \quad (3.6)$$

(‘M3.2_high_quality_climate_prediction_v1.2.Pdf - Google Drive’ n.d.)

όπου όλα τα σύμβολα έχουν επεξηγηθεί στην εξίσωση (3.5), ακόμα το $\overline{e(x, t)}$ είναι μια κλιματολογία αναφοράς της λεπτομερέστερης κλίμακας, και η άνω γραμμή δηλώνει την κλιματολογική μέσης τιμής στο χρόνο.

Τα αποτελέσματα αποθηκεύτηκαν με τη συνάρτηση CST_SaveExp σε μορφή αρχείου netCDF και επεξεργάστηκαν με το CDO (Climate Data Operators), ώστε από ημερήσια να μετατρέπουν σε μηνιαία δεδομένα. Τέλος, εφαρμόστηκε η συνάρτηση PlotQuantileMapping για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων (Βήμα4).

3.3.3.2 Βροχόπτωση



Σχήμα 3.5: Βήμα προς βήμα ο καταβιβασμός της κλίμακας της βροχόπτωσης από ανάλυση 1° σε 0,05°.

Σε αυτή τη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από 1993-2016 με ημερομηνία έκδοσης πρόγνωσης την 1^η Αυγούστου με σκοπό τη καλύτερη πληροφόρηση για το φθινόπωρο του 2002, το πιο υγρό καταγεγραμμένο φθινόπωρο της περιόδου.

Στο Σχήμα 3.5 απεικονίζεται η διαδικασία καταβιβασμού κλίμακας για την βροχόπτωση βήμα προς βήμα. Αρχικά φορτώθηκαν τα ημερήσια δεδομένα πρόγνωσης του συστήματος ECMWF55 και τα δεδομένα παρατήρησης επανα-ανάλυσης ERA5 με τη συνάρτηση CST_Load σε πλεγματική χωρική ανάλυση 1° (Βήμα1). Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της συνάρτησης

CST_Calibration με τη μέθοδο διόρθωσης σφαλμάτων μεροληψίας (Βήμα2). Ακολούθησε το βήμα του καταβιβασμού της κλίμακας. Χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα CHIRPS με πλεγματική χωρική ανάλυση $0,05^\circ$ για να βρεθούν τα ορογραφικά βάρη (orographic weights), με τη χρήση της συνάρτησης CST_RFWeights (Βήμα3), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$w(x, y) = \frac{c(x, y)}{s[c(x, y)]_{L_0}}, \quad (3.7)$$

(Terzago, Palazzi, and Von Hardenberg 2018b)

Όπου $c(x, y)$ η διαθέσιμη κλιματολογία αναφοράς της βροχόπτωσης σε λεπτομερή χωρική κλίμακα και S ο τελεστή εξομάλυνσης. Συγκεκριμένα, κάθε τιμή του $c(x, y)$ διαιρείται με τον τοπικό ομαλό μέσο όρο στην κλίμακα L_0 .

Τέλος χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση CST_FainFARM (Βήμα4), με τη βαθμονομημένη πρόγνωση από το Βήμα2 και τα ορογραφικά βάρη από το Βήμα 3, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\tilde{r}(x, y, t) \rightarrow \tilde{r}(x, y, t) \cdot w(x, y), \quad (3.8)$$

(Terzago, Palazzi, and Von Hardenberg 2018b)

όπου $\tilde{r}(x, y, t)$ πεδίο λεπτομερούς κλίμακας. Ουσιαστικά δημιουργείται ένα νέο πεδίο, στο οποίο η βροχόπτωση μειώνεται ή αυξάνεται σύμφωνα με τα βάρη που λαμβάνονται από τη μακροπρόθεσμη κλιματολογία. Η τελική προσαρμογή για τη διατήρηση της μέσης βροχόπτωσης στην κλίμακα L_0 , δηλαδή η εξίσωση:

$$r(x, y, t) = \frac{\tilde{r}(x, y, t) \langle P(x, y, t) \rangle_{L_0}}{\langle \tilde{r}(x, y, t) \rangle_{L_0}}, \quad (3.9)$$

(Terzago, Palazzi, and Von Hardenberg 2018b)

εφαρμόζεται και πάλι στο $\tilde{r}(x, y, t)$. Το πεδίο λεπτομερούς κλίμακας που προκύπτει $r(x, y, t)$ εξακολουθεί να συμπίπτει ακριβώς με το πεδίο αδρομερούς κλίμακας $P(X, Y, t)$ όταν και τα δύο αθροίζονται στην κλίμακα εμπιστοσύνης L_0 .

Τα τελικά δεδομένα αποθηκεύτηκαν με τη συνάρτηση CST_SaveExp σε μορφή αρχείου netCDF και επεξεργάστηκαν με το CDO (Climate Data Operators), ώστε από ημερήσια να μετατρέπουν σε μηνιαία δεδομένα. Τέλος, εφαρμόστηκε η συνάρτηση PlotQuantileMapping για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων (Βήμα4).

3.3.4 Πιθανολογική Πρόγνωση

Για την εφαρμογή της πιθανολογικής πρόγνωσης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την περίοδο 1993 έως 2022, με ημερομηνία έκδοσης πρόγνωσης την 1^η Οκτωβρίου. Σκοπός ήταν η εύρεση της πιθανότητας για τα επίπεδα θερμοκρασίας και βροχόπτωσης της επομένης εποχής και συγκεκριμένα για το χειμώνα (Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος) του 2023 και για τους πρώτους δυο μήνες της άνοιξης (Μάρτιος-Απρίλιος) του 2023.

Τα δεδομένα της πρόγνωσης του συστήματος ECMWF5 και τα δεδομένα παρατήρησης επανα-ανάλυσης ERA5, σε πλεγματοκή χωρική ανάλυση 1°, φορτώθηκαν με την συνάρτηση CST_Load. Εφαρμόστηκε η συνάρτηση CST_Anomaly, η οποία υπολογίζει την απόκλιση ως προς την κλιματολογία σε σχέση με τις ημερομηνίες έναρξης ή το χρόνο πρόγνωσης επιτρέποντας την εφαρμογή ή όχι της κοινής κλιματολογίας.

Στην συνέχεια για την εύρεση της πιθανότητας χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση ProbBins του s2dv, η οποία υπολογίζει τις πιθανότητες, με τιμές από 0 μέχρι 1, μιας πρόγνωσης σε σχέση με τις κλιματικές παρατηρήσεις. Δηλαδή κατανέμονται σε τρεις κατηγορίες (κάτω του κανονικού, κανονικού και πάνω του κανονικού) τα δείγματα της πρόγνωσης πολλαπλού δείγματος και υπολογίζεται η πιθανότητα των δειγμάτων της τελευταίας πρόβλεψης σε ποια κατηγορία ανήκουν. Τέλος, για την οπτικοποίηση της πιθανότητας χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση PlotMostLikelyQuantileMap. Αυτή η συνάρτηση λαμβάνει ως κύρια είσοδο μέσω των παραμέτρων probs, μια συλλογή χαρτών, ο καθένας περιέχει τις πιθανότητες (από 0 έως 1) των διαφορετικών κελιών πλέγματος που ανήκουν σε κατηγορία πιθανότητας όπως κάτω του κανονικού, κανονικού και πάνω του κανονικού.

3.3.5 Δημιουργία Σεναρίου Πρόγνωσης

Οι προγνώσεις πολλαπλού δείγματος παρέχουν μια πιθανολογική εικόνα των μέσων καιρικών συνθηκών σε υπο-εποχικές έως εποχικές χρονικές κλίμακες. Σε αυτές τις προγνώσεις πολλαπλού δείγματος, είναι χρήσιμο να ομαδοποιούνται οι μεμονωμένοι υπολογισμοί σύμφωνα με τα παρόμοια χαρακτηριστικά και να επιλέγεται το πιο αντιπροσωπευτικό δείγμα κάθε ομάδας. Αυτό επιτρέπει τον χαρακτηρισμό των σεναρίων πρόγνωσης σε μια πρόγνωση πολλαπλού δείγματος από πολλά μοντέλα (ή και ενός μοντέλου).

Η επιλογή των δειγμάτων του συνόλου πραγματοποιήθηκε με την συνάρτηση CST_EnsClustering, που βασίζεται στον αλγόριθμο k-means, για προγνώσεις πολλαπλού δείγματος.

Σε αυτή τη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το 1993 μέχρι το 2022 με ημερομηνία έκδοσης πρόγνωσης 1^η Οκτωβρίου, με σκοπό την εύρεση της πιθανότητας για τη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση της επομένης εποχής και συγκεκριμένα για το χειμώνα (Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος) του 2023 και για τους μήνες Μάρτιο-Απρίλιο του 2023, που αντιστοιχούν στους πρώτους δύο μήνες της άνοιξης. Τα δεδομένα της πρόγνωσης προήλθαν από το σύστημα

ECMWF5 και τα δεδομένα παρατήρησης ήταν δεδομένα επανα-ανάλυσης ERA5 σε πλεγματική χωρική ανάλυση 1° και φορτώθηκαν με τη συνάρτηση CST_Load. Εφαρμόστηκε η συνάρτηση CST_Anomaly όπως στην ενότητα 3.3.4 «Πιθανολογική Πρόγνωση». Έγινε χρήση της συνάρτησης CST_EnsClustering με τρεις ομαδοποιήσεις (σενάρια) για ψυχρές, κανονικές, θερμές συνθήκες. Η γραφική απεικόνιση έγινε με τη χρήση της PlotQuantileMapping.

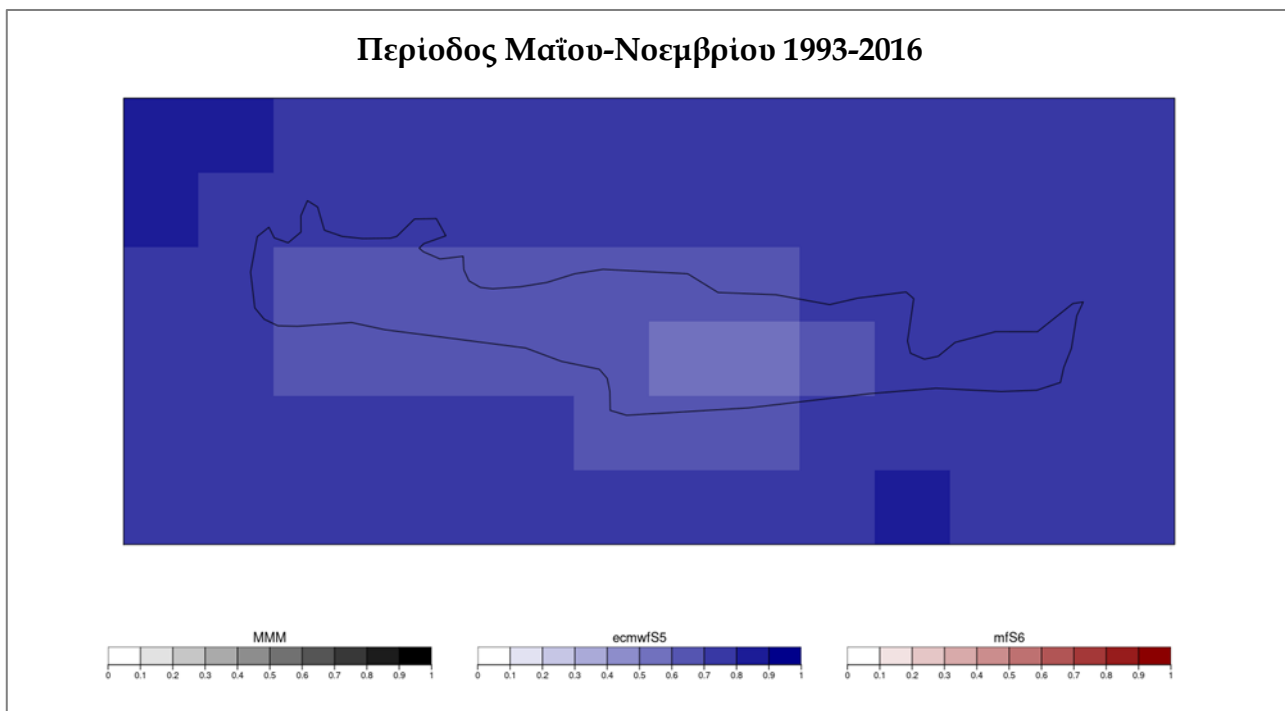
4 Αποτελέσματα

4.1 Αξιολόγηση Συνέπειας Εποχικών Προγνώσεων

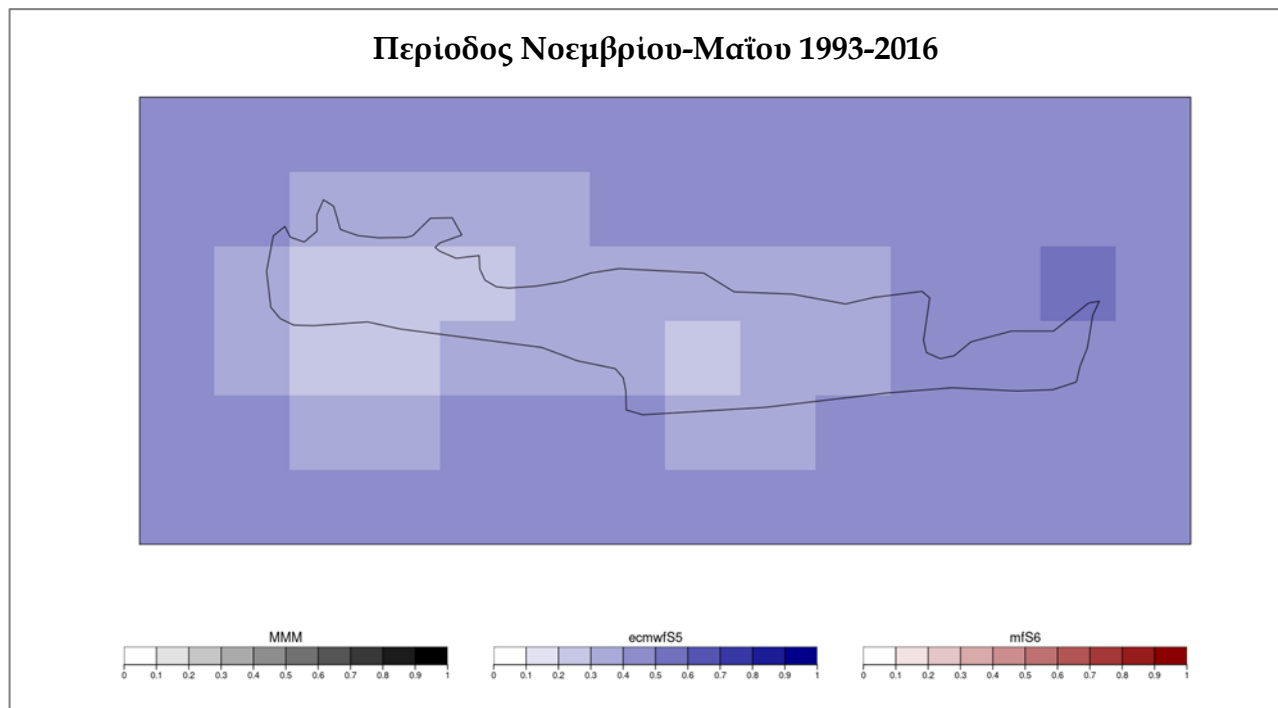
Δύο μοντέλα εποχικής πρόγνωσης, το ECMWF System 5 (ECMWF5) και το Météo-France System 6 (MFS6) αξιολογήθηκαν ως προς την προγνωστική τους συνέπεια. Τα δεδομένα αφορούν την περίοδο 1993-2016 για δύο χρονικά διαστήματα Μαΐου-Νοεμβρίου, με ημερομηνία έκδοσης πρόγνωσης την 1^η Μαΐου, και Νοεμβρίου-Μαΐου, με ημερομηνία έκδοσης 1^η Νοεμβρίου.

Οι ακόλουθοι χάρτες παρουσιάζουν το μέγιστο συντελεστή συσχέτισης θετικής ανωμαλίας (maximum positive Anomaly Correlation Coefficient (ACC)) μεταξύ των δύο μοντέλων. Το ACC για κάθε μοντέλο υπολογίζεται μεταξύ των αντίστοιχων προβλεπόμενων μέσων αποκλίσεων του συνόλου και των αποκλίσεων της παρατηρούμενης θερμοκρασίας και αντίστοιχα για τη βροχόπτωση που λαμβάνεται από τα δεδομένα παρατήρησης επανα-ανάλυσης ERA5 κατά την περίοδο 1993-2016. Τα μπλε (ECMWF5), κόκκινα (MFS6) και μαύρα (σύνολο των 2 μοντέλων) χρώματα υποδεικνύουν ποιο σύστημα επιτυγχάνει τη μέγιστη συσχέτιση.

4.1.1 Θερμοκρασία



Χάρτης 4.1: Καλύτερο σύστημα για θερμοκρασία περιόδου Μαΐου-Νοεμβρίου 1993-2016.



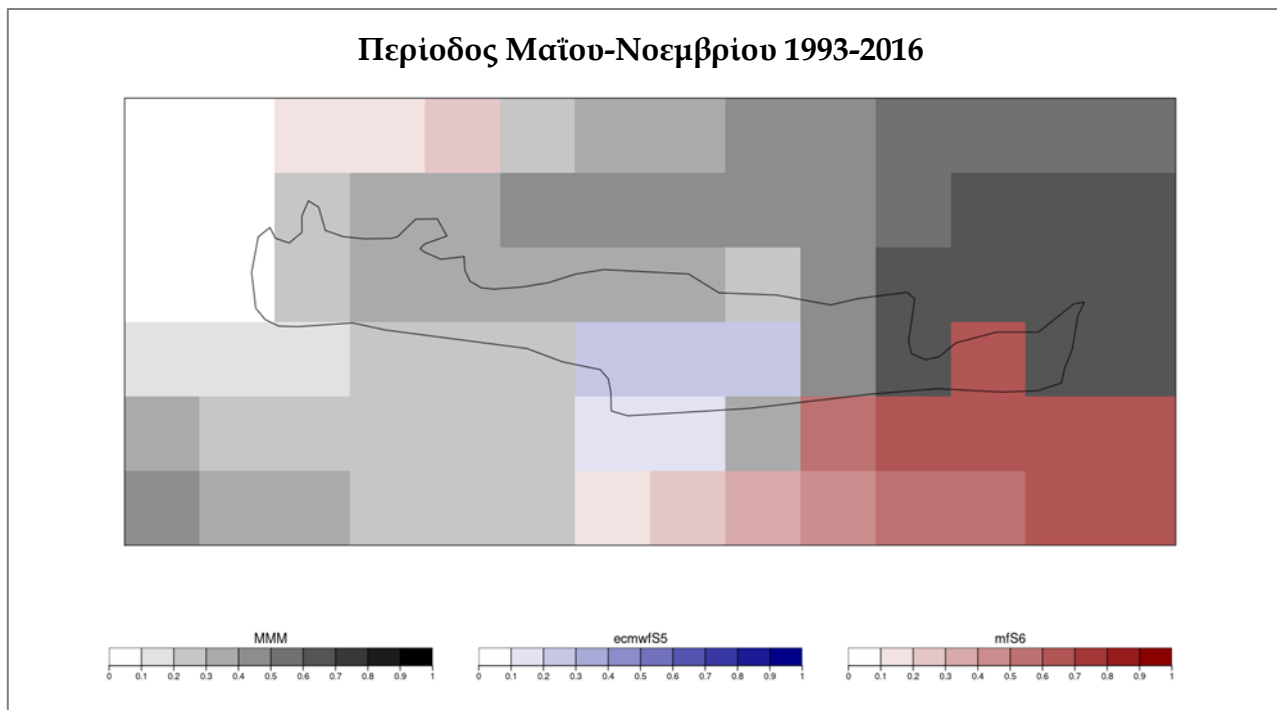
Χάρτης 4.2: Καλύτερο σύστημα για θερμοκρασία περιόδου Νοεμβρίου-Μαΐου 1993-2016.

Στους **Χάρτες 4.1 & 4.2** εμφανίζεται η διαφορετική απόδοση των συστημάτων στη θαλάσσια και στην ηπειρωτική περιοχή, καθώς παρατηρείται διαφορά στην ένταση του χρώματος. Όμως και στις δυο περιόδους υπερτερεί το σύστημα ECMWF5, με τιμές ACC από 0,5 έως 0,9 για την περίοδο Μαΐου-Νοεμβρίου και 0,2 έως 0,6 για την περίοδο Νοέμβριου-Μαΐου με μέγιστη τιμή το 1. Συνεπώς για την πρόγνωση της θερμοκρασίας μεταξύ των συστημάτων ECMWF5 και MFS6 επικρατέστερο είναι το πρώτο, με καλύτερη εφαρμογή την περίοδο Μαΐου-Νοεμβρίου.

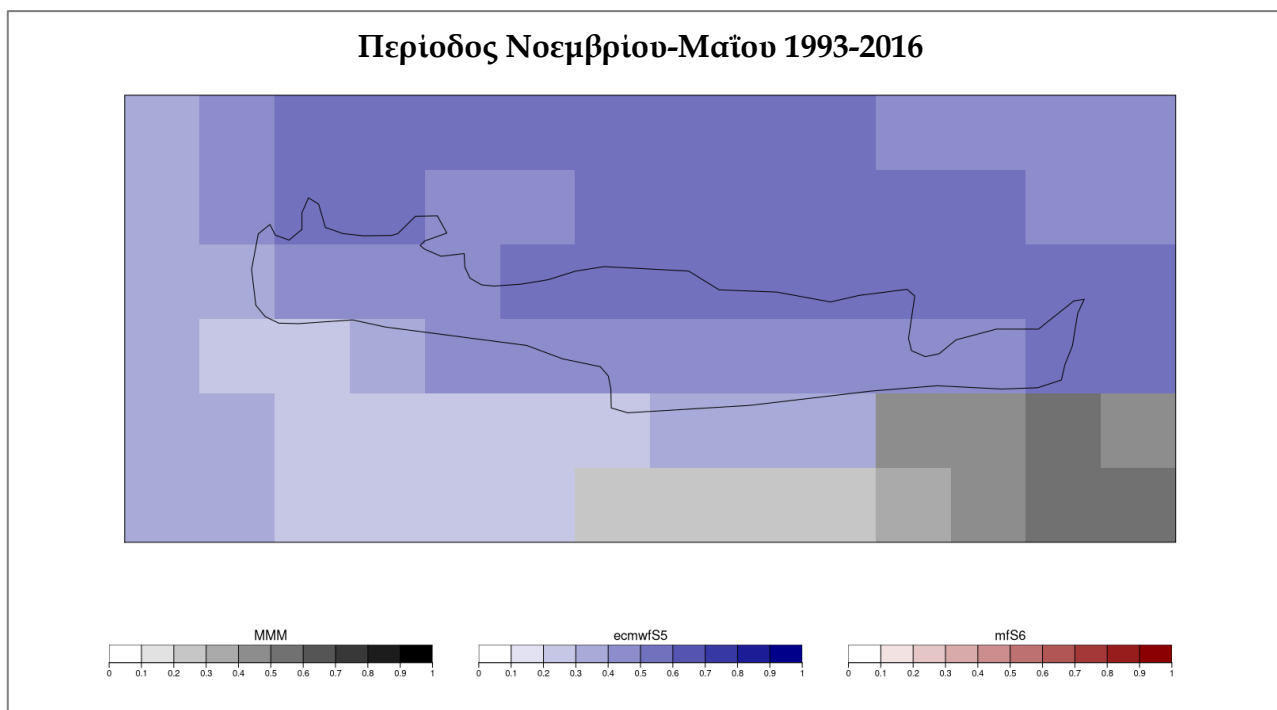
Στους ορεινούς όγκους ιδιαίτερα για την περίοδο Νοέμβριου-Μαΐου φαίνεται να μην έχει καλή απόδοση το σύστημα ECMWF5 τόσο στο νομό Χανίων, Ηρακλείου, δηλαδή στην ανατολική και κεντρική Κρήτη. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε δυο πηγές σφαλμάτων. Πρώτον, τα δεδομένα παρατήρησης επανα-ανάλυσης ERA5 να μην καταγράφουν σωστά τη χαμηλότερη θερμοκρασία, καθώς μπορεί να μην έχουν λεπτομερή παραμετροποίηση της ορογραφίας της περιοχής. Δηλαδή η κλίμακα που εξετάζεται να εξομαλύνεται χωρικά και να μην λαμβάνει υπόψιν τα μεγάλα υψόμετρα. Αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί από τους **Χάρτες 4.1 & 4.2**, καθώς τα κελιά με τις μικρότερες τιμές ACC 0,5 και 0,2 αντίστοιχα βρίσκονται στην ίδια θέση και περιέχουν υψηλούς ορεινούς όγκους της Κρήτης, το Όρος Ίδης (ή Ψηλορείτη) με μέγιστο υψόμετρο 2456m. Δεύτερον, μπορεί οι προγνώσεις των συστημάτων να μην είναι αντιπροσωπευτικές της περιοχής. Λόγω της χαοτικής φύσης της ατμοσφαιρας καθίσταται δύσκολη η ακριβής πρόγνωση για περιορισμένες περιοχές όπως η Κρήτη. Για να βρεθούν και να αντιμετωπιστούν αυτά τα σφάλματα, μπορούν οι προγνώσεις να

συγκριθούν και να βαθμονομηθούν με τα δεδομένα σταθμών και επανα-
ανάλυσης ERA5.

4.1.2 Βροχόπτωση



Χάρτης 4.3: Καλύτερο σύστημα για βροχόπτωση περιόδου Μαΐου-Νοεμβρίου 1993-2016.



Χάρτης 4.4: Καλύτερο σύστημα για βροχόπτωση περιόδου Νοεμβρίου-Μαΐου 1993-2016.

Στους **Χάρτες 4.3 & 4.4** εμφανίζονται και τα δυο συστήματα με διαφορετική απόδοση σε κάθε περίοδο. Στην περίοδο Μαΐου-Νοεμβρίου παρουσιάζονται και τα δυο συστήματα ECMWFS5 και MFS6 με τιμές ACC 0,1 έως 0,3 και 0,1 έως 0,5 αντίστοιχα. Όμως στο μεγαλύτερο εύρος της περιόδου δεν επικρατεί κάποιο από τα δυο συστήματα με τιμές ACC από 0 έως 0,5. Επιπλέον στην περίοδο Νοέμβριου-Μαΐου εμφανίζεται μόνο το σύστημα ECMWFS5 με τιμές ACC από 0,2 έως 0,6.

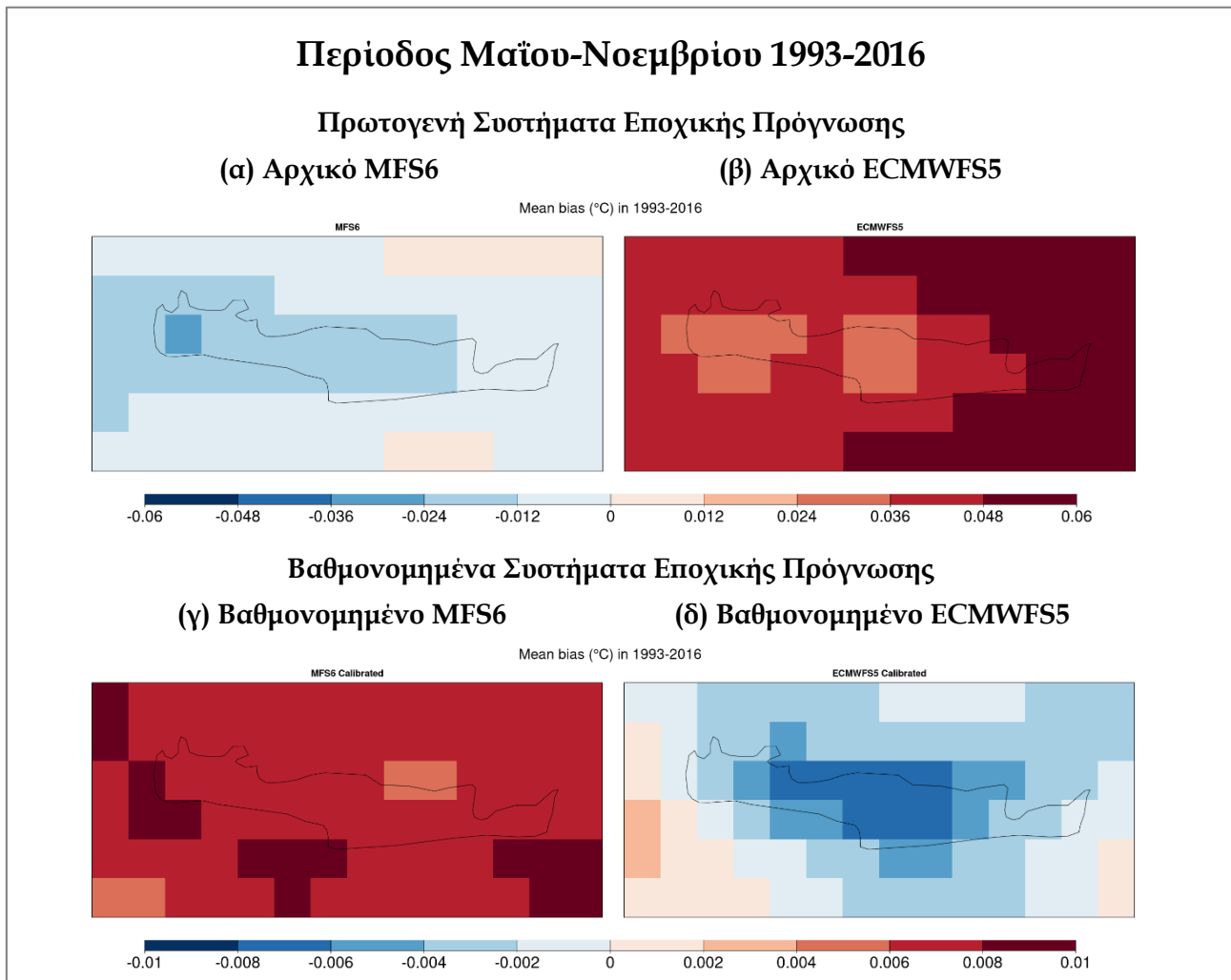
Στην περίοδο Μαΐου-Νοεμβρίου που απεικονίζει ο **Χάρτης 4.3**, μια πρακτικά ξηρή περίοδο με πολύ χαμηλές τιμές βροχόπτωσης, είναι ασαφές για το πιο σύστημα υπερισχύει. Στην περισσότερη επιφάνεια της Κρήτης φαίνεται ότι επικρατεί ένας συνδυασμός των δυο μοντέλων με το μεγαλύτερο εύρος να μην αντιστοιχεί σε κάποιο μοντέλο. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στα δεδομένα παρατήρησης επανα-ανάλυσης ERA5, δηλαδή να μην καταγράφεται σωστά η χαμηλότερη βροχόπτωση, είτε οι προγνώσεις των συστημάτων να μην είναι αντιπροσωπευτικές της περιοχής. Πιο συγκεκριμένα για την περιοχή της Μεσαράς, νότια κεντρική Κρήτη, επικρατεί το ECMWFS5 με χαμηλές τιμές ACC. Ενώ στην ανατολική Κρήτη, μια αρκετά ξηρή περιοχή, υπερισχύει το MFS6.

Ακόμα, για τον **Χάρτη 4.4** που αναφέρεται στην περίοδο Νοέμβριου-Μαΐου επικρατεί μόνο το σύστημα εποχικής πρόγνωσης ECMWFS5 με διαφορετική απόδοση σε κάθε περιοχή. Επομένως σε περιόδους που αναμένονται υψηλές τιμές βροχόπτωσης θεωρείται αξιόπιστο το σύστημα ECMWFS5.

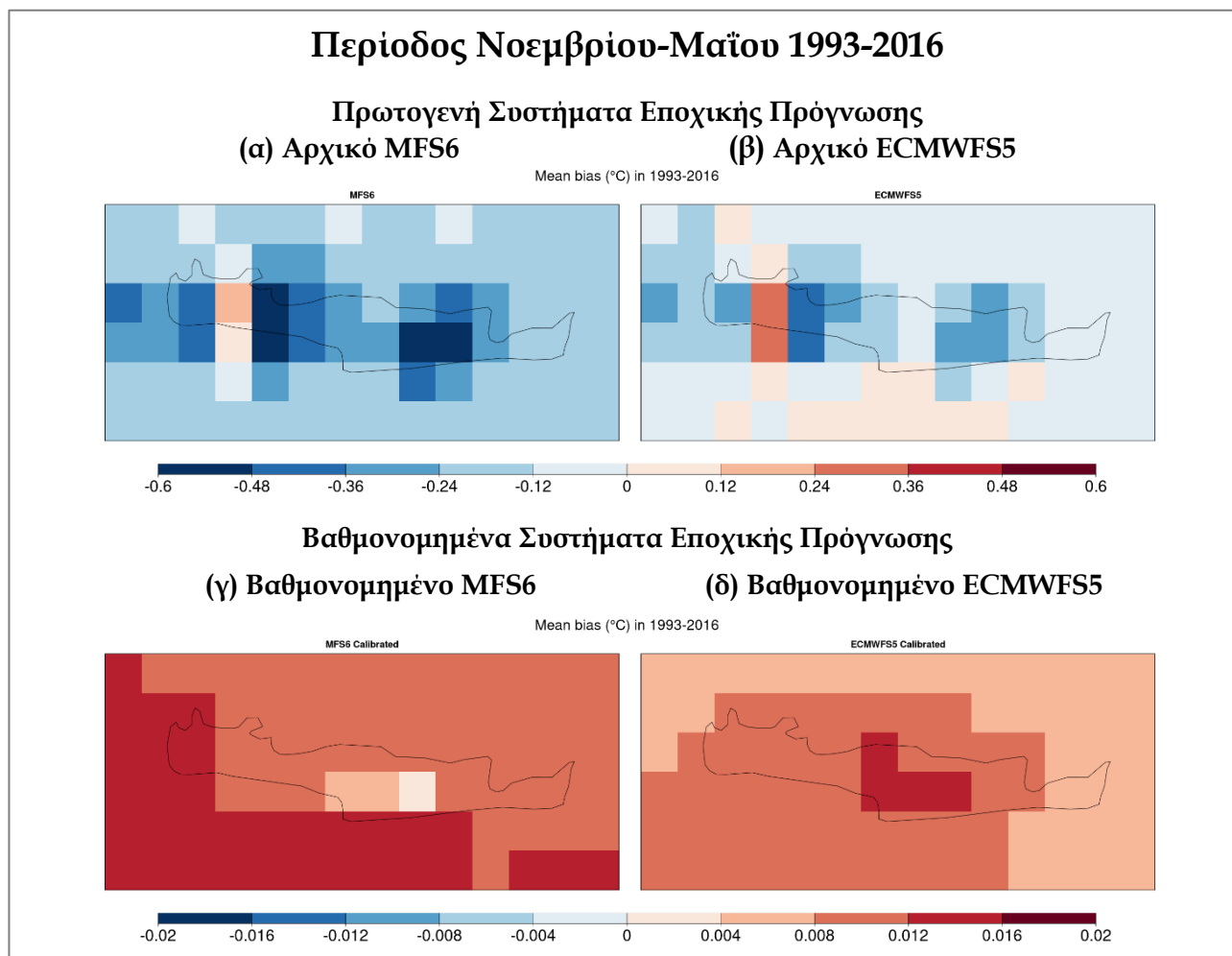
4.2 Βαθμονόμηση Πρόγνωσης

Η βαθμονόμηση μπορεί να θεωρηθεί ως ένας τρόπος απόκτησης πρόγνωσης με μέσες στατιστικές ιδιότητες παρόμοιες με αυτές ενός συνόλου δεδομένων αναφοράς όπως τα δεδομένα ERA5. Η συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε είναι η CST_Calibration, η οποία εκτελεί τη διόρθωση στις προσομοιώσεις των συστημάτων πρόγνωσης χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μεροληψίας.

4.2.1 Θερμοκρασία



Χάρτης 4.5: Απεικόνιση μέσου μεροληπτικού σφάλματος θερμοκρασίας περιόδου Μαΐου-Νοεμβρίου 1993-2016 για (α) αρχικό MFS6, (β) αρχικό ECMWF5, (γ) βαθμονομημένο MFS6 και (δ) βαθμονομημένο ECMWF5, (οι κλίμακες έχουν διαφορετική διαβάθμιση και εύρος).



Χάρτης 4.6: Απεικόνιση του μέσου μεροληπτικού σφάλματος θερμοκρασίας περιόδου Νοεμβρίου-Μαΐου 1993-2016 για (α) αρχικό MFS6, (β) αρχικό ECMWF55, (γ) βαθμονομημένο MFS6 και (δ) βαθμονομημένο ECMWF55, (οι κλίμακες έχουν διαφορετική διαβάθμιση και εύρος).

Για την περίοδο Μαΐου-Νοεμβρίου το αρχικό σύστημα MFS6 έχει μικρό αρνητικό μέσο μεροληπτικό σφάλμα και θετικό το αρχικό σύστημα ECMWF55. Όμως σε ότι αφορά τα βαθμονομημένα συστήματα, το ECMWF55 παρουσίασε μικρότερες τιμές μεροληπτικού σφάλματος σε αντίθεση με το MFS6. Αυτό μπορεί και να επιβεβαιωθεί από τα αποτελέσματα που περιέχονται στον **Πίνακα 4.1**. Για την περίοδο Νοεμβρίου-Μαΐου και τα δυο συστήματα έχουν απόκλιση προς αρνητικές τιμές, με μεγαλύτερες τιμές το μοντέλο MFS6. Όσο αφορά τα βαθμονομούμενα συστήματα οι τιμές είναι σαφώς μικρότερες από τα αρχικά αλλά είναι θετικές.

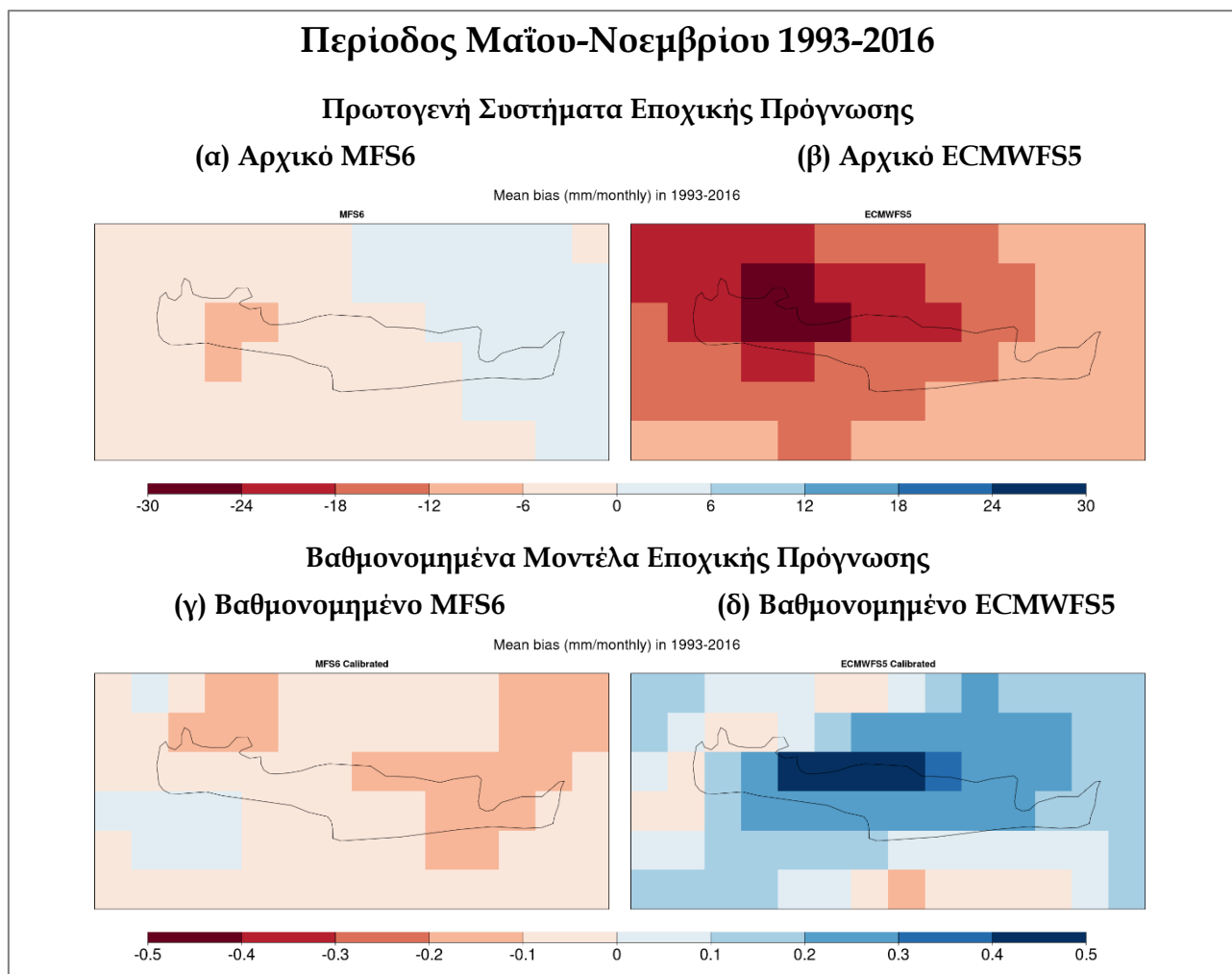
Στον παρακάτω **Πίνακα 4.1** απεικονίζονται οι μέσες τιμές των κελιών για το μέσο μεροληπτικό σφάλμα της θερμοκρασίας για κάθε περίοδο των πρωτογενών και βαθμονομημένων συστημάτων. Φαίνεται ότι το μέσο μεροληπτικό σφάλμα (mean bias) των βαθμονομημένων συστημάτων έχει μειωθεί κατά μια τάξη μεγέθους σε σχέση με τα πρωτογενή σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις. Γενικά για τη θερμοκρασία και τα δυο συστήματα έχουν σχετικά μικρά σφάλματα. Επομένως σκόπιμη είναι η χρήση του βαθμονομημένου

συστήματος ECMWFS5, καθώς τα μέσα μεροληπτικά σφάλματα του είναι τόσο μικρά που θεωρούνται αμελητέα.

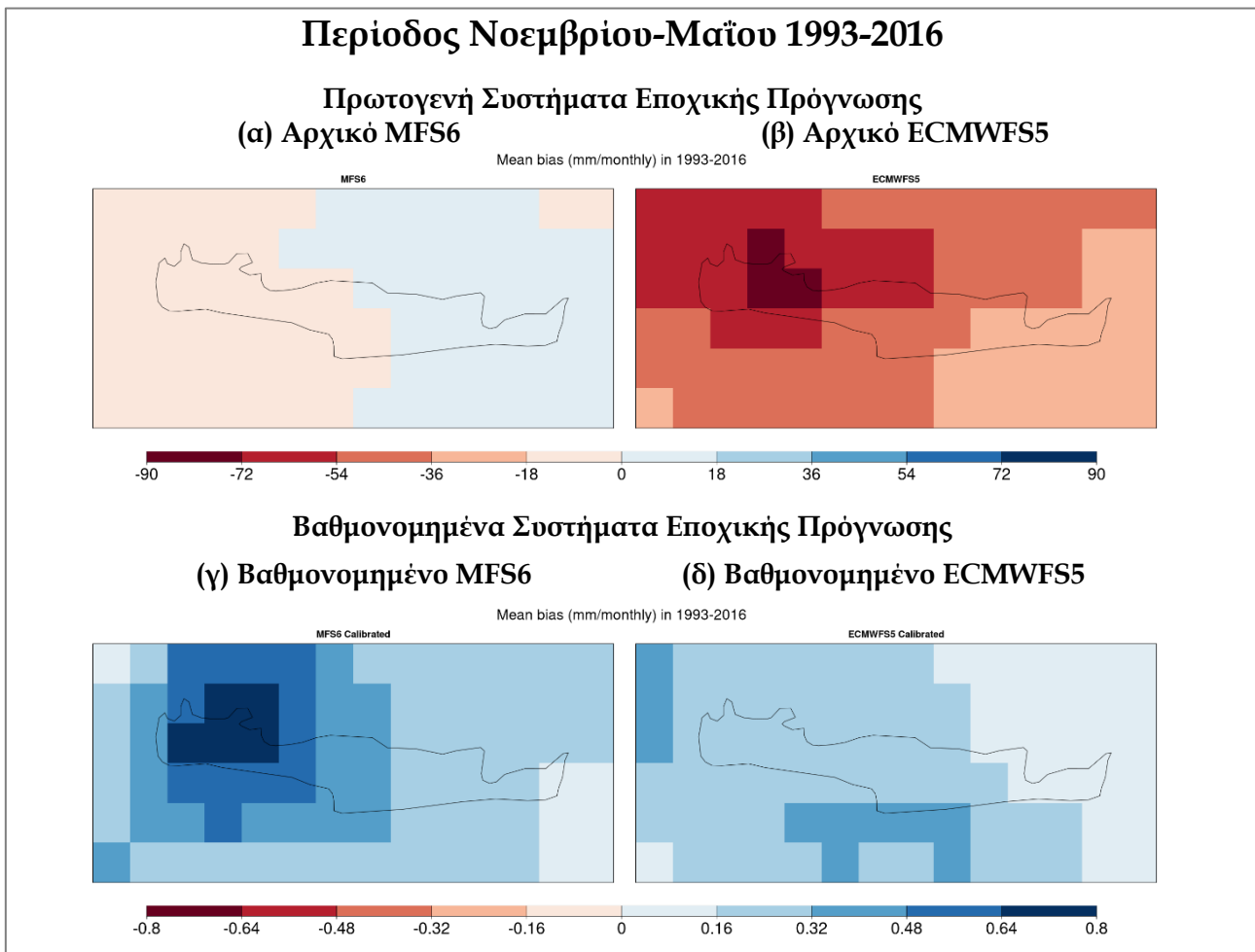
	Μέσο Μεροληπτικό Σφάλμα (Mean Bias), °C/month			
Περίοδος	Αρχικό ECMWFS5	Αρχικό MFS6	Βαθμονομημένο ECMWFS5	Βαθμονομημένο MFS6
Μαΐου-Νοεμβρίου	0,05	-0,01	0,003	0,01
Νοεμβρίου-Μαΐου	-0,08	-0,23	0,01	0,01

Πίνακας 4.1: Μέσες τιμές του συνόλου των κελιών της περιοχής ανάλυσης για το μέσο μεροληπτικό σφάλμα της θερμοκρασίας για περιόδους Μαΐου-Νοεμβρίου 1993-2016 και Νοεμβρίου-Μαΐου 1993-2016 των πρωτογενών και βαθμονομημένων συστημάτων.

4.2.2 Βροχόπτωση



Χάρτης 4.7: Απεικόνιση του μέσου μεροληπτικού σφάλματος βροχόπτωσης περιόδου Μαΐου-Νοεμβρίου 1993-2016 για (α) αρχικό MFS6, (β) αρχικό ECMWFS5, (γ) βαθμονομημένο MFS6 και (δ) βαθμονομημένο ECMWFS5, (οι κλίμακες έχουν διαφορετική διαβάθμιση και εύρος).



Χάρτης 4.8: Απεικόνιση του μέσου μεροληπτικού σφάλματος βροχόπτωσης περιόδου Νοεμβρίου-Μαΐου 1993-2016 για (α) αρχικό MFS6, (β) αρχικό ECMWF5, (γ) βαθμονομημένο MFS6 και (δ) βαθμονομημένο ECMWF5, (οι κλίμακες έχουν διαφορετική διαβάθμιση και εύρος).

Για την περίοδο Μαΐου-Νοεμβρίου το αρχικό σύστημα MFS6 έχει μικρότερες τιμές μεροληπτικού σφάλματος (bias) μια τάξη κάτω σε σχέση με το πρωτογενές μοντέλο ECMWF5, οι οποίες τιμές τείνουν προς τα αρνητικά. Το ίδιο ισχύει για την περίοδο Νοεμβρίου- Μαΐου με τη διαφορά ότι οι τιμές είναι πιο μεγάλες, αφού αναφέρονται σε μια υγρή περίοδο. Στα βαθμονομημένα συστήματα τα μεροληπτικά σφάλματα έχουν μειωθεί κατά δυο τάξεις μεγέθους, επιβεβαιώνεται και από τον **Πίνακα 4.2**, μπορούν να θεωρηθούν αμελητέα. Για την περίοδο Μαΐου-Νοεμβρίου το βαθμονομημένο μοντέλο MFS6 έχει μικρότερες τιμές μεροληπτικού σφάλματος σε σχέση με το βαθμονομημένο μοντέλο ECMWF5. Ενώ για την περίοδο Νοεμβρίου-Μαΐου ισχύει το αντίθετο.

Στο παρακάτω **Πίνακα 4.2** απεικονίζονται οι μέσες τιμές των κελιών για τα μεροληπτικά σφάλματα για κάθε περίοδο των πρωτογενών και βαθμονομημένων συστημάτων. Φαίνεται ότι το μεροληπτικό σφάλμα (bias) των βαθμονομημένων συστημάτων έχει μειωθεί κατά δυο τάξεις μεγέθους σε σχέση με τα αρχικά σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις.

Επομένως για μια υγρή περίοδος σκόπιμη είναι η χρήση του βαθμονομημένου συστήματος ECMWFS5, καθώς τα μεροληπτικά σφάλματα θεωρούνται αμελητέα.

	Μέσο Μεροληπτικό Σφάλμα (Bias), mm/month			
Περίοδος	Αρχικό ECMWFS5	Αρχικό MFS6	Βαθμονομημένο ECMWFS5	Βαθμονομημένο MFS6
Μαΐου-Νοεμβρίου	-14,69	-1,39	0,14	-0,06
Νοεμβρίου-Μαΐου	-45,79	-2,12	0,21	0,35

Πίνακας 4.2: Μέσες τιμές του συνόλου των κελιών της περιοχής ανάλυσης για το μέσο μεροληπτικό σφάλμα της βροχόπτωσης για περιόδους Μαΐου-Νοεμβρίου 1993-2016 και Νοεμβρίου-Μαΐου 1993-2016 των πρωτογενών και βαθμονομημένων συστημάτων.

4.3 Καταβιβασμός Κλίμακας Πρόγνωσης

Συνήθως τα αποτελέσματα των προγνώσεων είναι σε πλεγματική χωρική ανάλυση 1° ($\sim 100\text{km}$), επομένως η χωρική λεπτομέρεια της πληροφορίας σε σχέση με το μέγεθος της Κρήτης δεν είναι επαρκής από πλευράς χρηστικότητας. Επομένως ο καταβιβασμός κλίμακας, με στόχο της ανάπτυξης πληροφορίας σε επαρκή λεπτομέρεια είναι απαραίτητος.

4.3.1 Θερμοκρασία

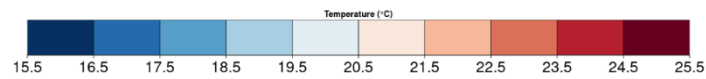
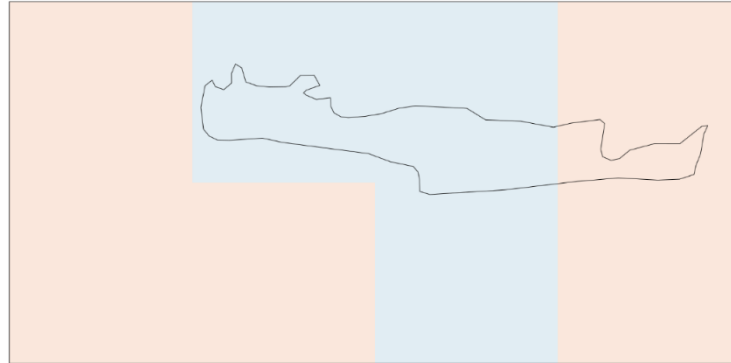
Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα του συστήματος εποχικής πρόγνωσης ECMWFS5 για το 2003, με ημερομηνία έκδοσης πρόγνωσης την 1^η Μαΐου, με σκοπό την καλύτερη πληροφόρηση για το καλοκαίρι του 2003, το πιο θερμό της περιόδου 1993-2016. Για τον καταβιβασμό κλίμακας της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση CST_RFTemp με την ορογραφία της περιοχής, με αρχική πλεγματική χωρική ανάλυση 1° ($\sim 100\text{km}$) σε τελική πλεγματική χωρική ανάλυση $0,25^\circ$ ($\sim 25\text{km}$). Ακόμα έχει προστεθεί ένας καταβιβασμός του συστήματος ECMWFS5 με την κλιματολογία της επανα-ανάλυσης ERA5 σε πλεγματική χωρική ανάλυση $0,25^\circ$, που προέρχεται από το MEDSCOPE.

Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία Ιουνίου 2003

Αρχικό Σύστημα Εποχικής Πρόγνωσης ECMWF5 (1°)

ECMWF5 June 2003 (1°)

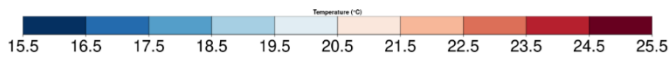
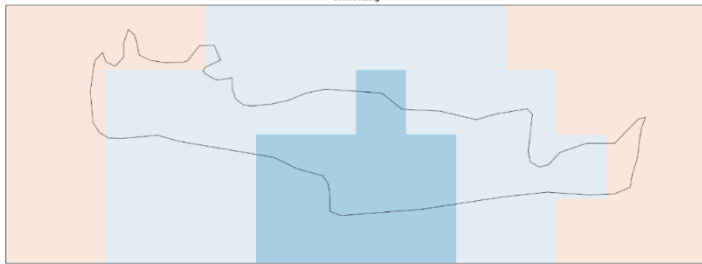
original



Καταβιβασμένο Σύστημα Εποχικής Πρόγνωσης ECMWF5 : (α) με ορογραφία (0,25°) (β) κλιματολογία ERA5 (0,25°)

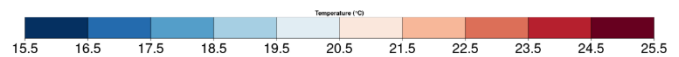
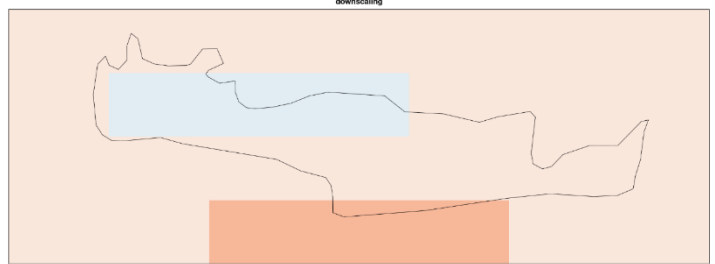
ECMWF5 June 2003 (0.25°)

downscaling



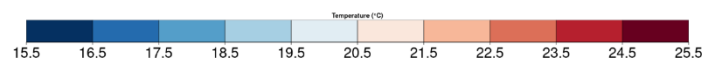
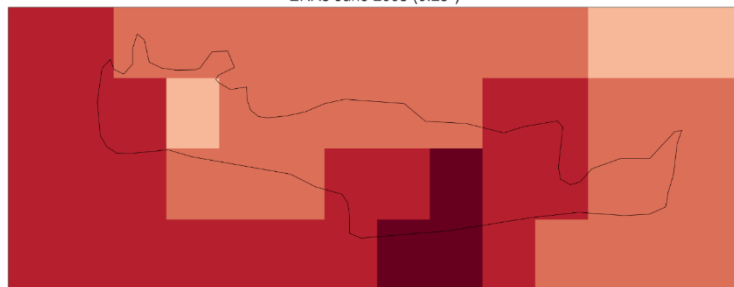
ECMWF5 June 2003 (0.25°)

downscaling



ERA5 (0,25°)

ERA5 June 2003 (0.25°)



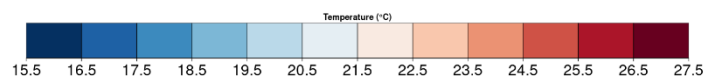
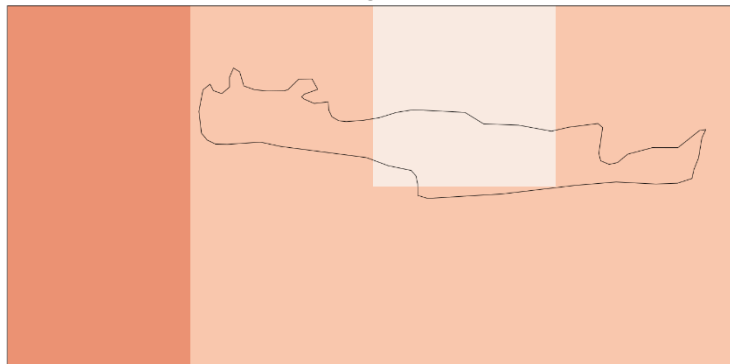
Χάρτης 4.9: Αρχική εποχική πρόγνωση ECMWF5 (1°), Καταβιβασμένη (α) με ορογραφία, (β) με κλιματολογία ERA5 εποχιακή πρόγνωση ECMWF5 (0,25°) & ERA5 για τον Ιούνιο 2003.

Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία Ιουλίου 2003

Αρχικό Σύστημα Εποχικής Πρόγνωσης ECMWF5

ECMWF5 July 2003 (1°)

original

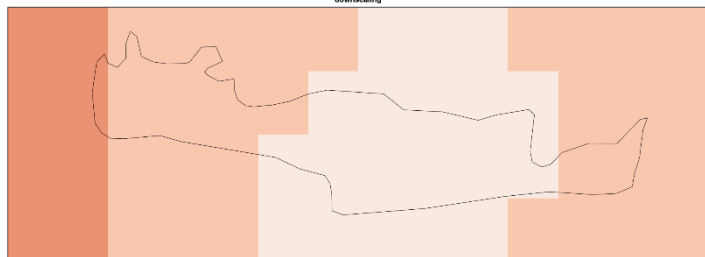


Καταβιβασμένο Σύστημα Εποχικής Πρόγνωσης ECMWF5 :

(α) με ορογραφία (0,25°)

ECMWF5 July 2003 (0.25°)

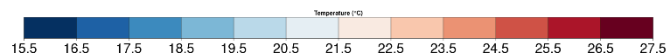
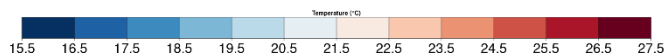
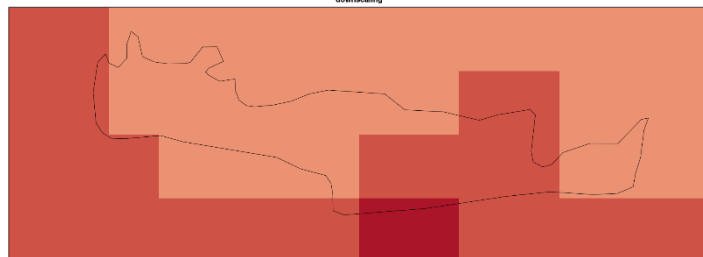
downscaling



(β) με κλιματολογία ERA5 (0,25°)

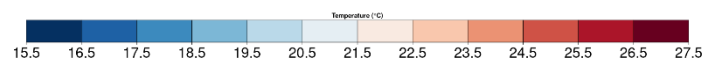
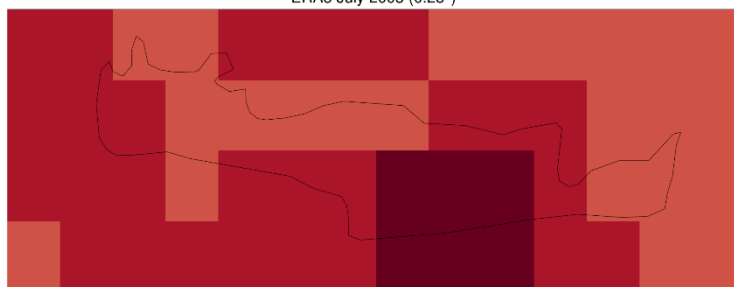
ECMWF5 July 2003 (0.25°)

downscaling



ERA5 (0,25°)

ERA5 July 2003 (0.25°)



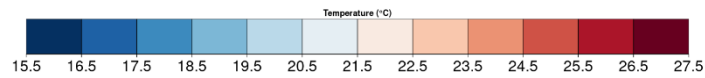
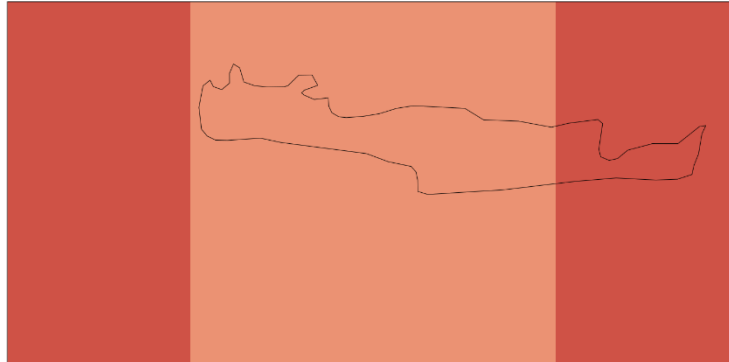
Χάρτης 4.10: Αρχική εποχική πρόγνωση ECMWF5 (1°) , Καταβιβασμένη (α) με ορογραφία ,(β) με κλιματολογία ERA5 εποχική πρόγνωση ECMWF5 (0,25°) & ERA5 για τον Ιούλιο 2003.

Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία Αυγούστου 2003

Αρχικό Σύστημα Εποχικής Πρόγνωσης ECMWF5

ECMWF5 August 2003 (1°)

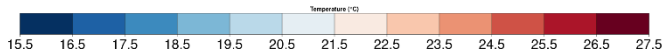
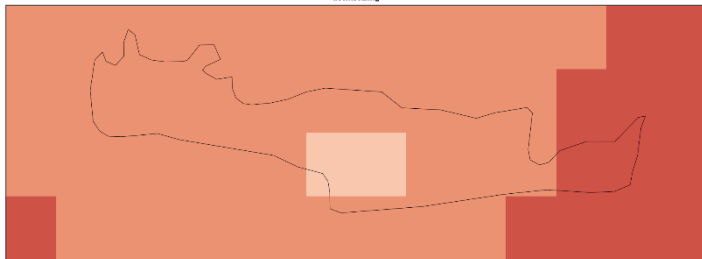
original



Καταβιβασμένο Σύστημα Εποχικής Πρόγνωσης ECMWF5 : (α) με ορογραφία (0,25°) (β) με κλιματολογία ERA5 (0,25°)

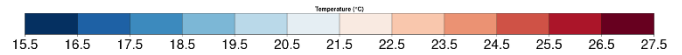
ECMWF5 August 2003 (0.25°)

downscaling



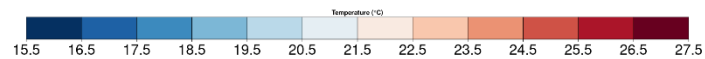
ECMWF5 August 2003 (0.25°)

downscaling



ERA5 (0,25°)

ERA5 August 2003 (0.25°)



Χάρτης 4.11: Αρχική εποχική πρόγνωση ECMWF5 (1°), Καταβιβασμένη (α) με ορογραφία, (β) με κλιματολογία ERA5 εποχική πρόγνωση ECMWF5 (0,25°) & ERA5 για τον Αύγουστο 2003.

Μήνας		Μηνιαία Θερμοκρασία (°C)			
		Αρχικό ECMWF5	Καταβιβασμένο με ορογραφία ECMWF5	Καταβιβασμένο με κλιματολογία ECMWF5	ERA5
Ιούνιος	Ελάχιστη	19,5	18,5	18,5	20,5
	Μέγιστη	21,5	21,5	21,5	25,5
Ιούλιος	Ελάχιστη	21,5	21,5	22,5	24,5
	Μέγιστη	24,5	24,5	27,5	27,5
Αύγουστος	Ελάχιστη	23,5	22,5	24,5	24,5
	Μέγιστη	25,5	24,5	27,5	27,5

Πίνακας 4.3: Μέγιστη και Ελάχιστη Θερμοκρασία που προκύπτει από την αρχική πρόγνωση, την καταβιβασμένη πρόγνωση με ορογραφία, την καταβιβασμένη πρόγνωση με κλιματολογία και δεδομένα παρατήρησης ERA5

από μέσες τιμές από ολόκληρη την περιοχή μελέτης (χωρικός μέσος όρος).

Για τον Ιούνιο του 2003, απεικόνιση στο **Χάρτη 4.9**, και τα δυο καταβιβασμένα μοντέλα έχουν το ίδιο εύρος τιμών αλλά με διαφορετική κατανομή. Αυτό με την ορογραφία έχει πιο ψυχρές τιμές θερμοκρασίας σε σχέση με αυτές της κλιματολογίας. Αλλά και τα δυο δεν αντιστοιχούν στα δεδομένα παρατήρησης ERA5, καθώς έχει πολύ υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας, όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 4.3**, +2°C στην ελάχιστη τιμή και μέχρι +4°C στη μέγιστη τιμή. Επομένως δεν θεωρείται αξιόπιστος ο μήνας Ιούνιος.

Για τον Ιούλιο του 2003, απεικόνιση στο **Χάρτη 4.10**, στην αρχική εποχική πρόγνωση του ECMWF5 η θερμοκρασία έχει τιμές από 21,5°C με 24,5°C, όμως για τη βαθμονομημένη πρόγνωση με ορογραφία παρατηρούνται οι ίδιες τιμές σε άλλη αναλογία. Ακόμα για το καταβιβασμό με τη κλιματολογία του ERA5 παρατηρείται διόρθωση της θερμοκρασίας κατά +1°C στην ελάχιστη και +3°C στην μέγιστη σε σχέση με την αρχική πρόγνωση. Όμως είναι πιο κοντά στα δεδομένα παρατήρησης ERA5.

Για τον Αύγουστο του 2003, απεικόνιση στο **Χάρτη 4.11**, στην αρχική εποχική πρόγνωση του ECMWF5 η θερμοκρασία έχει τιμές από 23,5°C με 25,5°C, όμως για τη βαθμονομημένη πρόγνωση με ορογραφία παρατηρούνται μείωση 1°C στην ελάχιστη θερμοκρασία σε σχέση με την αρχική. Επιπλέον, για το καταβιβασμό με τη κλιματολογία του ERA5 παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας κατά +1°C στην ελάχιστη και +2°C στην μέγιστη σε σχέση με την αρχική, αλλά είναι πιο κοντά στα δεδομένα παρατήρησης ERA5.

Όσο αφορά το καταβιβασμό της θερμοκρασίας με την ορογραφία παρατηρείται μια μείωση της θερμοκρασίας σε όλες τις προγνώσεις στην κεντρική Κρήτη, η οποία είναι λογική καθώς η περιοχή αυτή θεωρείται ορεινή και περιέχει τον Ψηλορείτη με μέγιστο υψόμετρο 2456m. Όμως σε ότι αφορά με την συσχέτιση τους με τα δεδομένα παρατήρησης ERA5. Υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας όσο αφορά τις τιμές αλλά και την περιοχή που εμφανίζονται.

Όμως τα δεδομένα παρατήρησης ERA5 σε σχέση με την καταβιβαμένη πρόγνωση με την κλιματολογία του ERA5 είναι αρκετά κοντά στο εύρος των τιμών θερμοκρασίας αλλά και στην περιοχή εφαρμογής. Όμως αυτό μπορεί να οφείλεται ότι προέρχονται από την ίδια πηγή δεδομένων.

Παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στις τιμές θερμοκρασίας αναμεσα στην αρχική πρόγνωση ECMWFS5 και στα δεδομένα παρατήρησης ERA5. Όμως υπάρχει μια κοινή κατανομή των τιμών στην ίδια περιοχή. Δηλαδή οι μέγιστες με τις αντίστοιχες μέγιστες και οι ελάχιστες με τις ελάχιστες.

4.3.2 Βροχόπτωση

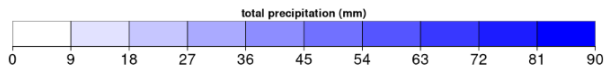
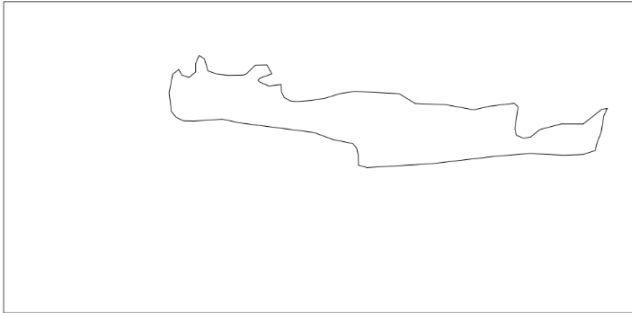
Σε αυτή τη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα του συστήματος εποχικής πρόγνωσης ECMWFS5 για το 2002, με ημερομηνία έκδοσης πρόγνωσης την 1^η Αυγούστου, με σκοπό τη καλύτερη πληροφόρηση για το φθινόπωρο του 2002, το πιο υγρό φθινόπωρο της περιόδου 1993-2016. Για τον καταβιβασμό της κλίμακας χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση CST_RainFARM με την χρήση των ορογραφικών βαρών των δεδομένων παρατήρησης CHIRPS, ώστε η αρχική κλίμακα σε πλεγματική χωρική ανάλυση 1° (~100km) να καταβιβαστεί σε πλεγματική χωρική ανάλυση 0,05° (~5km).

Συνολική Μηνιαία Βροχόπτωση Σεπτεμβρίου 2002

(α) ECMWFS5 1°

ECMWFS5 September 2002 (1°)

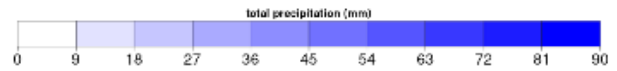
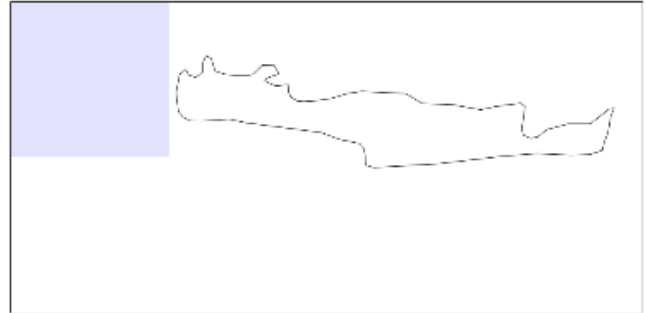
Original



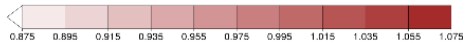
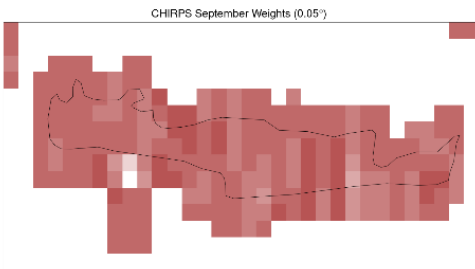
(β) Βαθμονόμηση ECMWFS5 1°

ECMWFS5 September 2002 (1°)

Calibration



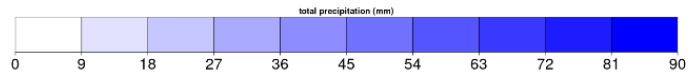
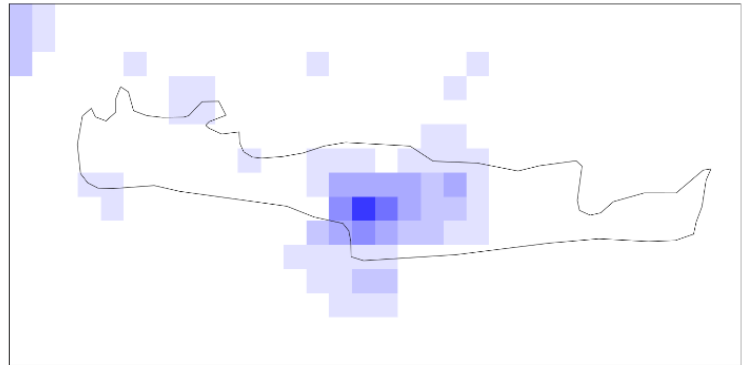
(γ) Ορογραφικά βάρη σε 0,05°



(δ) Καταβιβασμός με ορογραφικά βάρη σε 0,05°

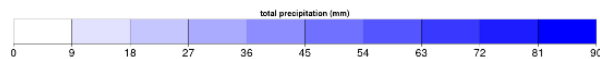
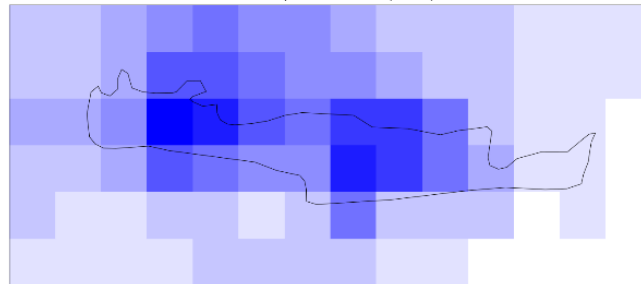
ECMWFS5 September 2002 (0.05°)

downscaling



(ε) ERA5 0,25°

ERA5 September 2002 (0.25°)



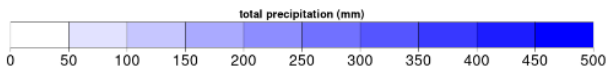
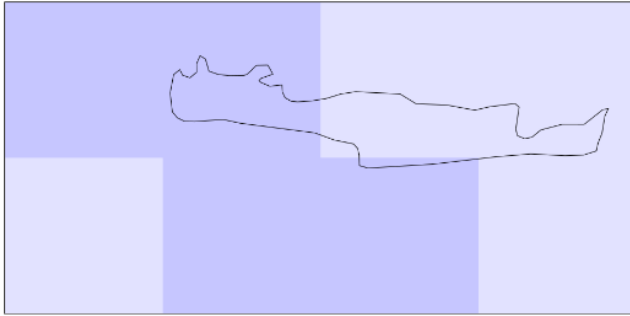
Χάρτης 4.12: Απεικόνιση της συνολικής μηνιαίας βροχόπτωσης για το Σεπτέμβριο του 2002 σε κάθε φάση επεξεργασίας: (α) αρχική πρόγνωση συστήματος ECMWFS5 σε 1°, (β) βαθμονόμηση πρόγνωσης συστήματος ECMWFS5 1°, (γ) ορογραφικά βάρη σε 0,05°, (δ) καταβιβασμός κλίμακας με ορογραφικά βάρη σε 0,05° και (ε) ERA5 σε 0,25°.

Συνολική Μηνιαία Βροχόπτωση Οκτωβρίου 2002

(α) ECMWFS5 1°

ECMWFS5 October 2002 (1°)

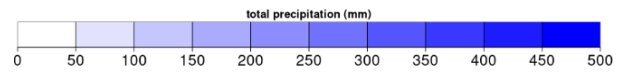
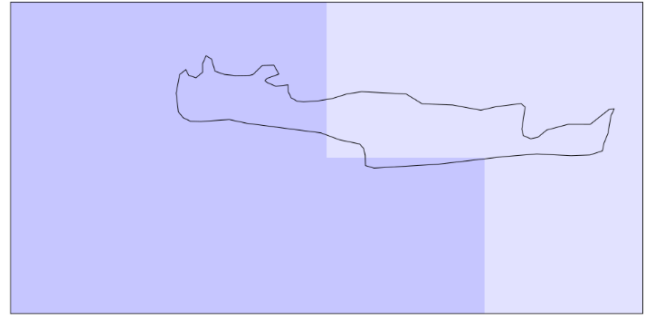
Original



(β) Βαθμονόμηση ECMWFS5 1°

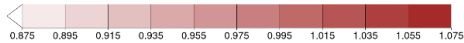
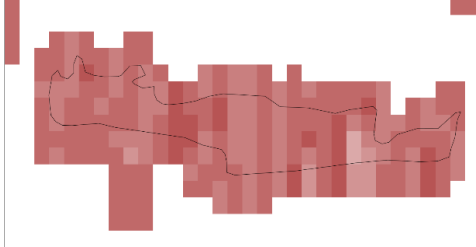
ECMWFS5 October 2002 (1°)

Calibration



(γ) Ορογραφικά βάρη σε 0,05°

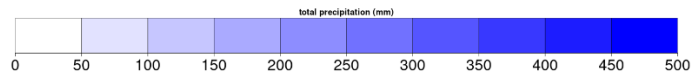
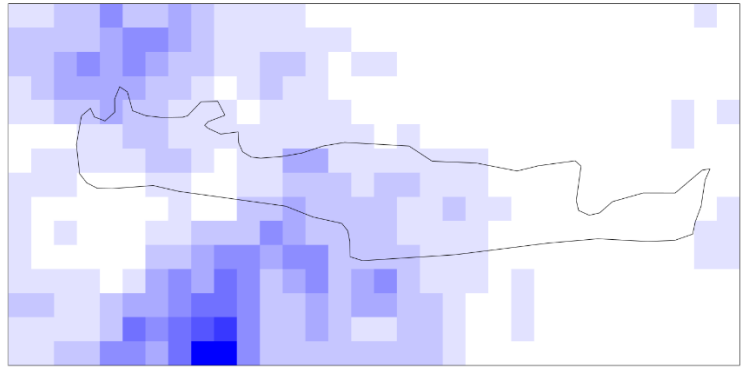
CHIRPS October Weights (0.05°)



(δ) Καταβιβασμός με ορογραφικά βάρη σε 0,05°

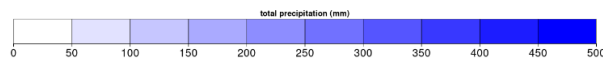
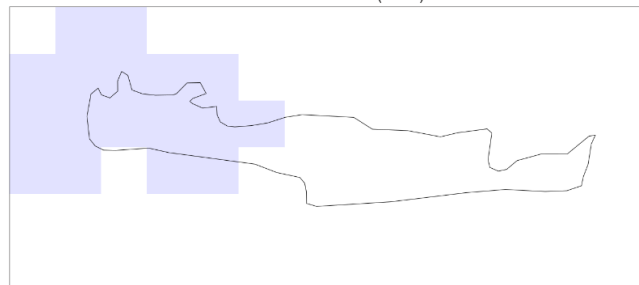
ECMWFS5 October 2002 (0.05°)

downscaling



(ε) ERA5 0,25°

ERA5 October 2002 (0.25°)



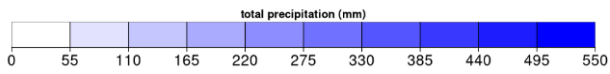
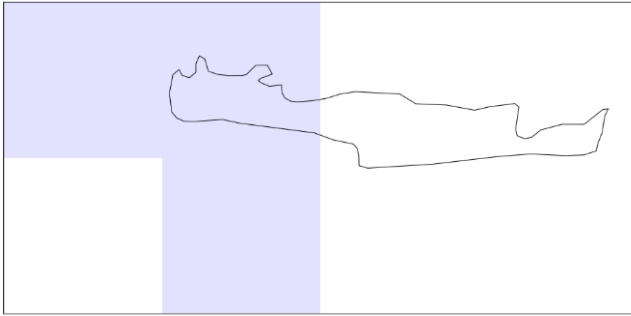
Χάρτης 4.13: Απεικόνιση της συνολικής μηνιαίας βροχόπτωσης για το Οκτώβριο του 2002 σε κάθε φάση επεξεργασίας: (α) αρχική πρόγνωση συστήματος ECMWFS5 σε 1°, (β) βαθμονόμηση πρόγνωσης συστήματος ECMWFS5 1°, (γ) ορογραφικά βάρη σε 0,05°, (δ) καταβιβασμός κλίμακας με ορογραφικά βάρη σε 0,05° και (ε) ERA5 σε 0,25°.

Συνολική Μηνιαία Βροχόπτωση Νοεμβρίου 2002

(α) ECMWFS5 1°

ECMWFS5 November 2002 (1°)

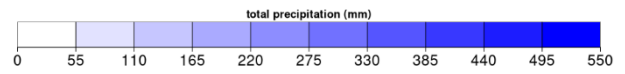
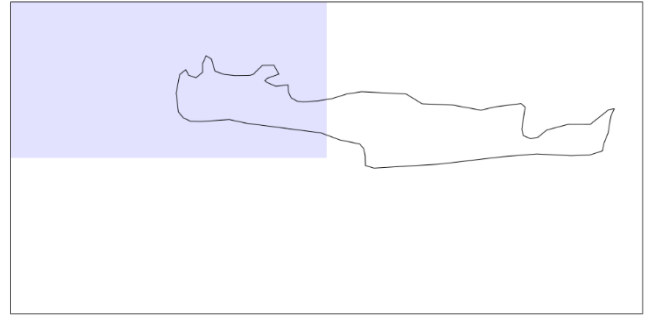
Original



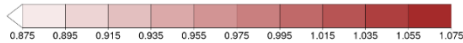
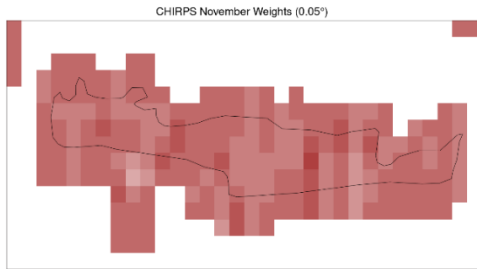
(β) Βαθμονόμηση ECMWFS5 1°

ECMWFS5 November 2002 (1°)

Calibration



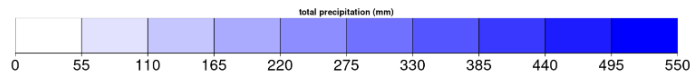
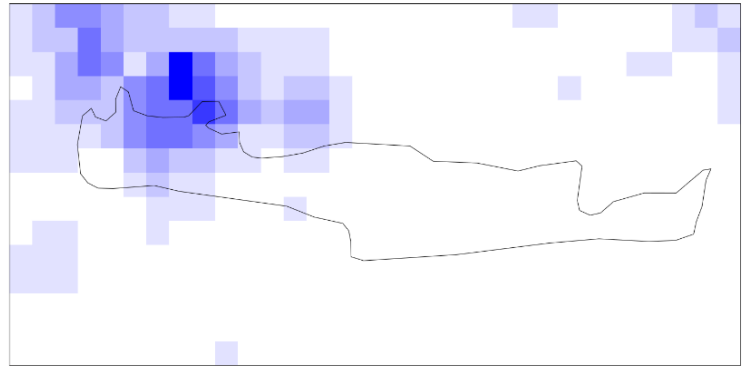
(γ) Ορογραφικά βάρη σε 0,05°



(δ) Καταβιβασμός με ορογραφικά βάρη σε 0,05°

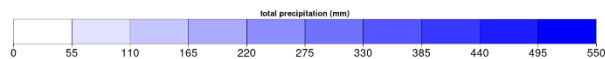
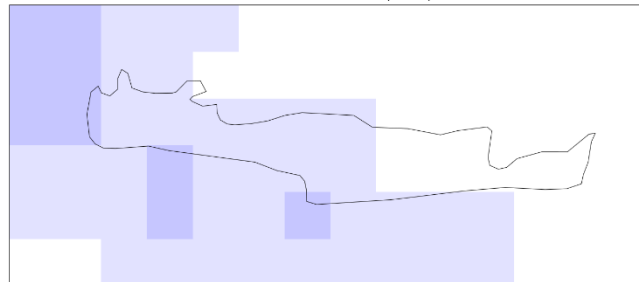
ECMWFS5 November 2002 (0.05°)

downscaling



(ε) ERA5 0,25°

ERA5 November 2002 (0.25°)



Χάρτης 4.14: Απεικόνιση της συνολικής μηνιαίας βροχόπτωσης για το Νοέμβριο του 2002 σε κάθε φάση επεξεργασίας: (α) αρχική πρόγνωση συστήματος ECMWFS5 σε 1°, (β) βαθμονόμηση πρόγνωσης συστήματος ECMWFS5 1°, (γ) ορογραφικά βάρη σε 0,05°, (δ) καταβιβασμός κλίμακας με ορογραφικά βάρη σε 0,05° και (ε) ERA5 σε 0,25°.

Στο **Χάρτη 4.12**, από τα δεδομένα παρατήρησης ERA5 παρατηρείται η τάση για βροχόπτωση στη δυτική και κεντρική Κρήτη για το Σεπτέμβριο του 2002. Όμως, τα αρχικά δεδομένα της εποχικής πρόγνωσης ECMWF55 δεν μπορούν να το επιβεβαιώσουν. Αφού ακολουθήθηκε μια διαδικασία βαθμονόμησης και η εφαρμογή της συνάρτησης RainFARM με τα ορογραφικά βάρη CHIRPS υπολογίστηκε η χωρικά καταβιβασμένη πρόγνωση ECMWF55, η οποία δείχνει βροχόπτωση στην κεντρική Κρήτη με μέγιστη μηνιαία τιμή 90mm. Επομένως θεωρείται ότι υπάρχει αστοχία στο δυτικό κομμάτι της Κρήτης καθώς το σύστημα ECMWF55 δεν έχει υψηλές τιμές βροχόπτωσης σε αυτή την περιοχή όπως έχουν τα δεδομένα επανα-ανάλυσης ERA5.

Για τον Οκτώβριο του 2002, **Χάρτης 4.13**, τα δεδομένα παρατήρησης ERA5 επιβεβαιώνουν τα αρχικά και βαθμονομημένα δεδομένα της εποχικής πρόγνωσης ECMWF55. Η καταβιβασμένη πρόγνωση ECMWF55 συμφωνεί με τον αρχικό ισχυρισμό, με μέγιστη μηνιαία τιμή στην ηπειρώτικη Κρήτη 250mm. Επομένως θεωρείται επιτυχημένη πρόγνωση της βροχόπτωσης.

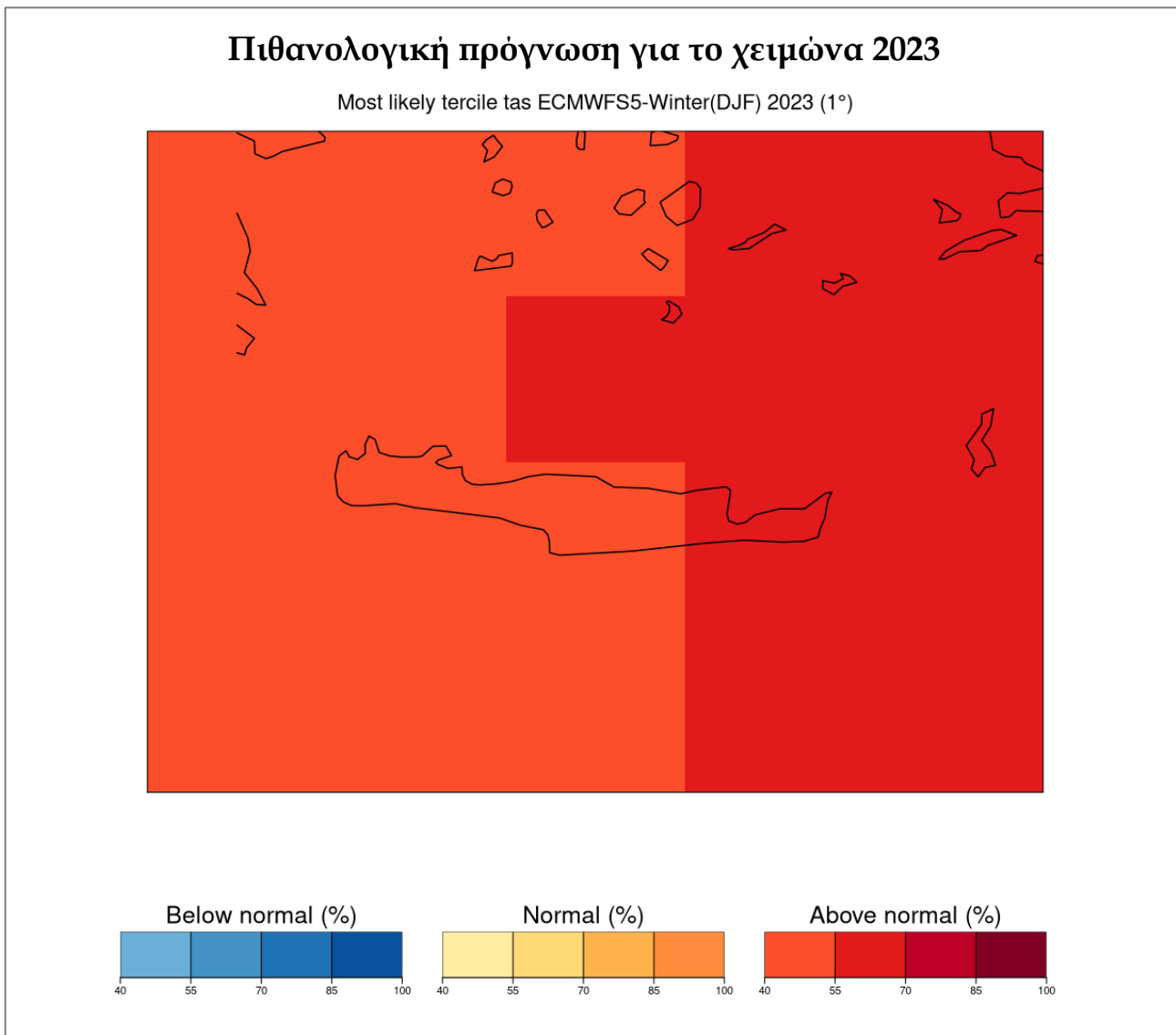
Από τα δεδομένα παρατήρησης ERA5 παρατηρείται η τάση για βροχόπτωση στη δυτική και κεντρική ηπειρωτική Κρήτη για το Νοέμβριο του 2002, **Χάρτης 4.14**. Αυτό επιβεβαιώνεται μόνο για τα δυτικά από τα αρχικά και βαθμονομημένα δεδομένα πρόγνωσης ECMWF55. Η καταβιβασμένη πρόγνωση ECMWF55 συμφωνεί με τη τάση βροχόπτωσης στα δυτικά, με μέγιστη μηνιαία τιμή στην ηπειρώτικη Κρήτη 440mm. Αλλά δεν δίνει καμία τιμή βροχόπτωσης για τη κεντρική Κρήτη όπως τα δεδομένα ERA5.

Στους δυο από τους τρεις μήνες παρατηρείται μια κοινή τάση για βροχόπτωση σε περιοχές μεταξύ της αρχικής πρόγνωσης ECMWF55 και των δεδομένων παρατήρησης επανα-ανάλυσης ERA5. Αυτή η συσχέτιση υπάρχει και στην καταβιβασμένη πρόγνωση. Η σειρά των μηνών από την μικρότερη στην μεγαλύτερη τιμή βροχόπτωσης επιβεβαιώνεται και από τα δεδομένα ERA5.

4.4 Πιθανολογική Πρόγνωση

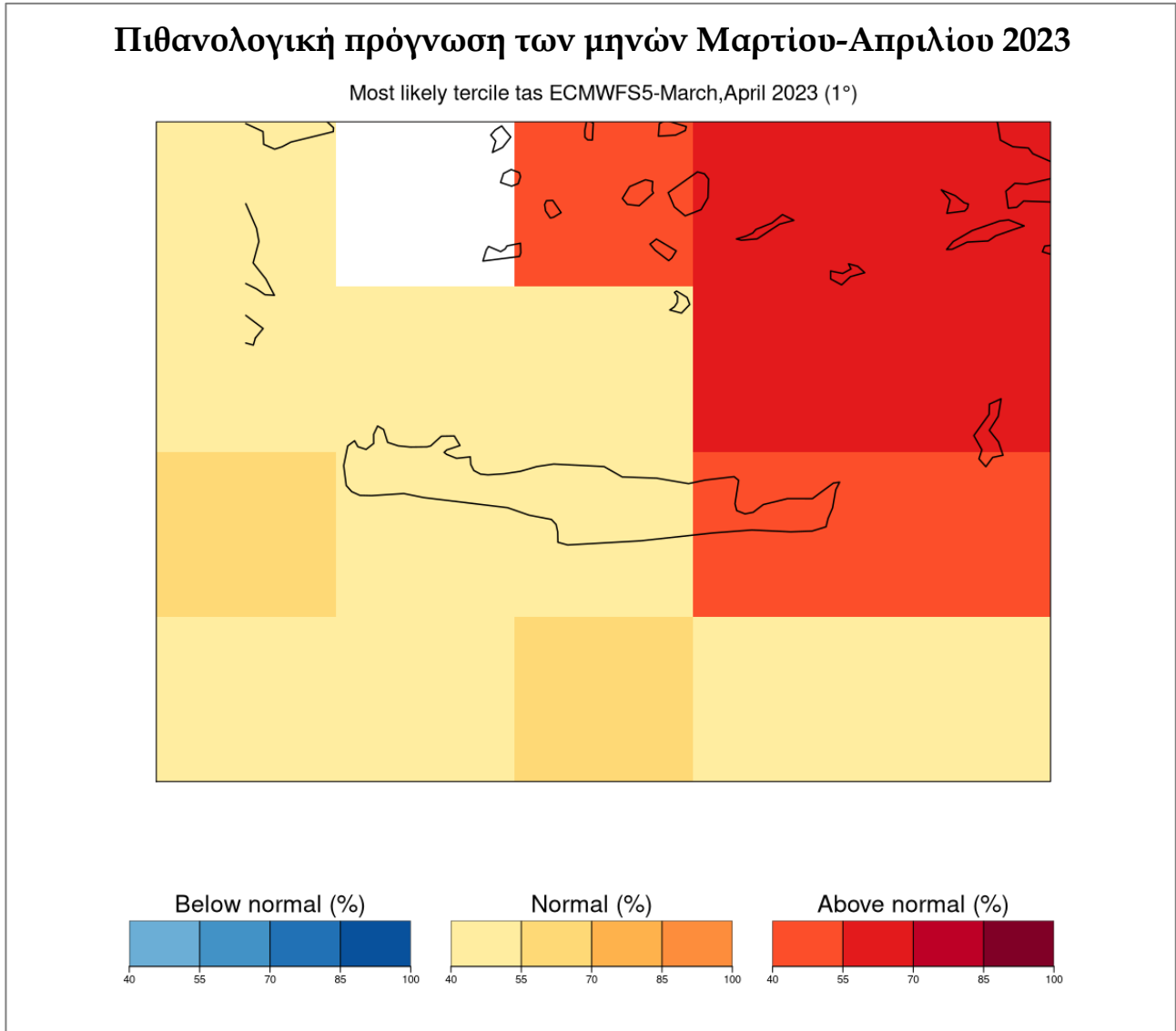
Με τη χρήση της συνάρτησης MostLikelyTercile μπορεί να υπολογιστούν οι πιθανότητες της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης που είναι κάτω του κανονικού, εντός του κανονικού εύρους και πάνω του κανονικού. Δηλαδή δημιουργείται μια πιθανολογική πρόγνωση για την επερχόμενη περίοδο με τη χρήση του συστήματος εποχικής πρόγνωσης ECMWF System 5. Οι προγνώσεις που χρησιμοποιήθηκαν αρχικοποιούνται στην 1^η Οκτωβρίου, με δεδομένα παρατήρησης ERA5 της περιόδου 1993-2022. Ο στόχος είναι η πρόγνωση της πιθανότητας της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης για το χειμώνα, Δεκέμβριος-Φεβρουάριος (DJF), και για τους μήνες Μαρτίου-Απριλίου του 2023.

4.4.1 Θερμοκρασία



Χάρτης 4.15: Πιθανότητα θερμοκρασίας κάτω του κανονικού, εντός του κανονικού εύρους και πάνω του κανονικού για το χειμώνα του 2023.

Όπως φαίνεται και από το **Χάρτη 4.15**, η πιθανότητα της θερμοκρασίας για όλη την Κρήτη για το χειμώνα του 2022-2023 είναι σε επίπεδα πάνω από το κανονικό. Στη δυτική και κεντρική Κρήτη με ποσοστό 40-55% και στην ανατολική με ποσοστό 55-70%.



Χάρτης 4.16: Πιθανότητα θερμοκρασίας κάτω του κανονικού, κανονικού και πάνω του κανονικού για τον Μάρτη, Απρίλη του 2023.

Η πιθανότητα της θερμοκρασίας για τους μήνες Μάρτιο, Απρίλιο είναι κανονικό και πάνω από το κανονικό όπως φαίνεται στο **Χάρτη 4.16**. Πιο συγκεκριμένα, στη δυτική και κεντρική Κρήτη κανονικές τιμές με ποσοστό 40-55% και στην ανατολική πάνω του κανονικού με ποσοστό 40-55%.

Όμως για την σωστή ερμηνεία των **Χαρτών 4.15 & 4.16** και για ένα πιο ρεαλιστικό αποτέλεσμα, πρέπει να ληφθεί υπόψιν η αυξητική τάση της θερμοκρασία λόγω της κλιματικής αλλαγής. Διότι αυτό δεν συμπεριλαμβάνεται στο τρόπο λειτουργίας της συνάρτησης ProbBins. Δηλαδή οι κανονικές τιμές

θερμοκρασίας του σήμερα είναι διαφορετικές από τις κανονικές τιμές του 1993, που σημαίνει σαν αποτέλεσμα ότι η κανονική τιμή θερμοκρασίας (Normal) μπορεί να είναι χαμηλότερη θερμοκρασία (Below normal), από ότι είναι λόγω της κλιματικής αλλαγής. Επομένως οι κανονικές τιμές μπορεί να είναι κάτω του κανονικού στην πραγματικότητα.

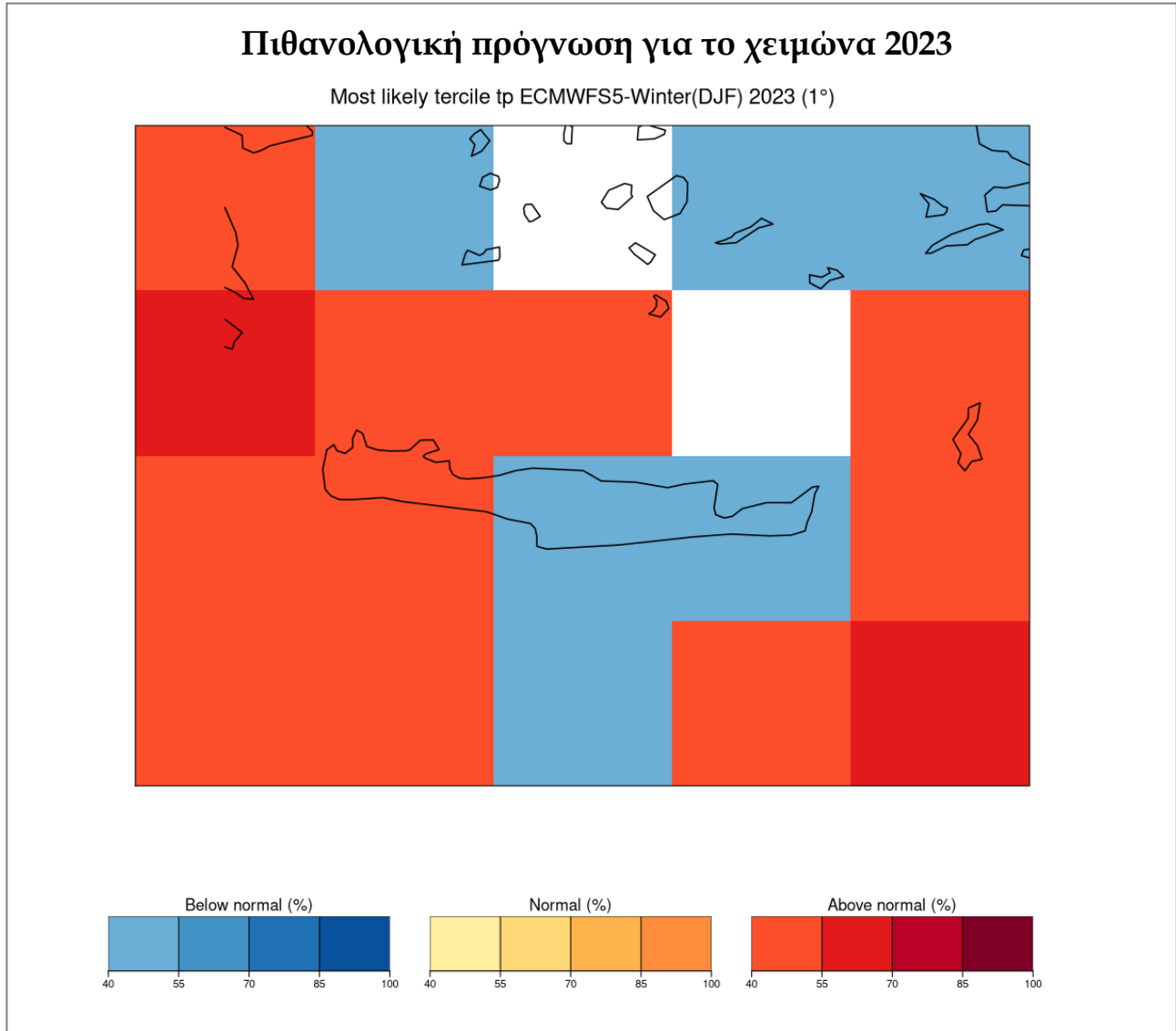
Αξιολογώντας με αυτό το γνώμονα τους **Χάρτες 4.15 & 4.16**, για το χειμώνα του 2023 υπάρχει ο αρχικός ισχυρισμός ότι η πιθανότητα της θερμοκρασία είναι πάνω του κανονικού σε όλη την Κρήτη, αλλά μπορεί στα κεντρικά, δυτικά του νησιού να είναι κανονική καθώς τα ποσοστά αυτών των περιοχών είναι χαμηλά. Όμως, από το **Πίνακα 4.4** παρατηρείται ότι στους τρεις σταθμούς στα δυτικά (Σούδα Χανιά), κεντρικά (Ηράκλειο) και ανατολικά (Σητεία) για το χειμώνα του 2023 η θερμοκρασία στην πλειοψηφία ήταν μεγαλύτερη από την περίοδο 1955-2010. Επομένως θεωρείται μια επιτυχημένη πρόγνωση.

Για τους μήνες Μαρτίου-Απριλίου η θερμοκρασία συμπεριλαμβάνοντας τον παράγοντα της κλιματικής αλλαγής μπορεί να πέσει και κάτω του κανονικού στα δυτικά και κεντρικά. Το οποίο επιβεβαιώνεται από τα δεδομένα σταθμών του **Πίνακα 4.4**, καθώς παρατηρούνται τιμές κοντά του κανονικού και κάτω για τα δυτικά, κεντρικά και κανονικές με μεγαλύτερες τιμές στα ανατολικά.

Μήνας	Περιοχή	Μέση Θερμοκρασία (°C)	
		Περίόδου 1955-2010	Περίόδου 2022-2023
Δεκέμβριος	Ηράκλειο	13,8	15,5
	Σητεία	13,9	16,2
	Σούδα Χανιά	12,7	14,6
Ιανουάριος	Ηράκλειο	12,1	13,2
	Σητεία	12,2	13,9
	Σούδα Χανιά	11,0	12,3
Φεβρουάριος	Ηράκλειο	12,2	11,6
	Σητεία	12,2	12,5
	Σούδα Χανιά	11,0	10,9
Μάρτιος	Ηράκλειο	13,6	14,3
	Σητεία	13,7	13,7
	Σούδα Χανιά	12,7	13,8
Απρίλιος	Ηράκλειο	16,6	16,2
	Σητεία	16,6	16,9
	Σούδα Χανιά	15,9	15,7

Πίνακας 4.4: Μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας σε επιλεγμένους σταθμούς, δεδομένα για την περίοδο 1955-2010 από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία και περίοδο 2022-2023 από το Meteo. Με **Bold** είναι οι τιμές της περιόδου 2022-2023 με μεγαλύτερη τιμή από της περιόδου 1955-2010.

4.4.2 Βροχόπτωση



Χάρτης 4.17: Πιθανότητα βροχόπτωσης κάτω του κανονικού, κανονικού και πάνω του κανονικού για το χειμώνα του 2023.

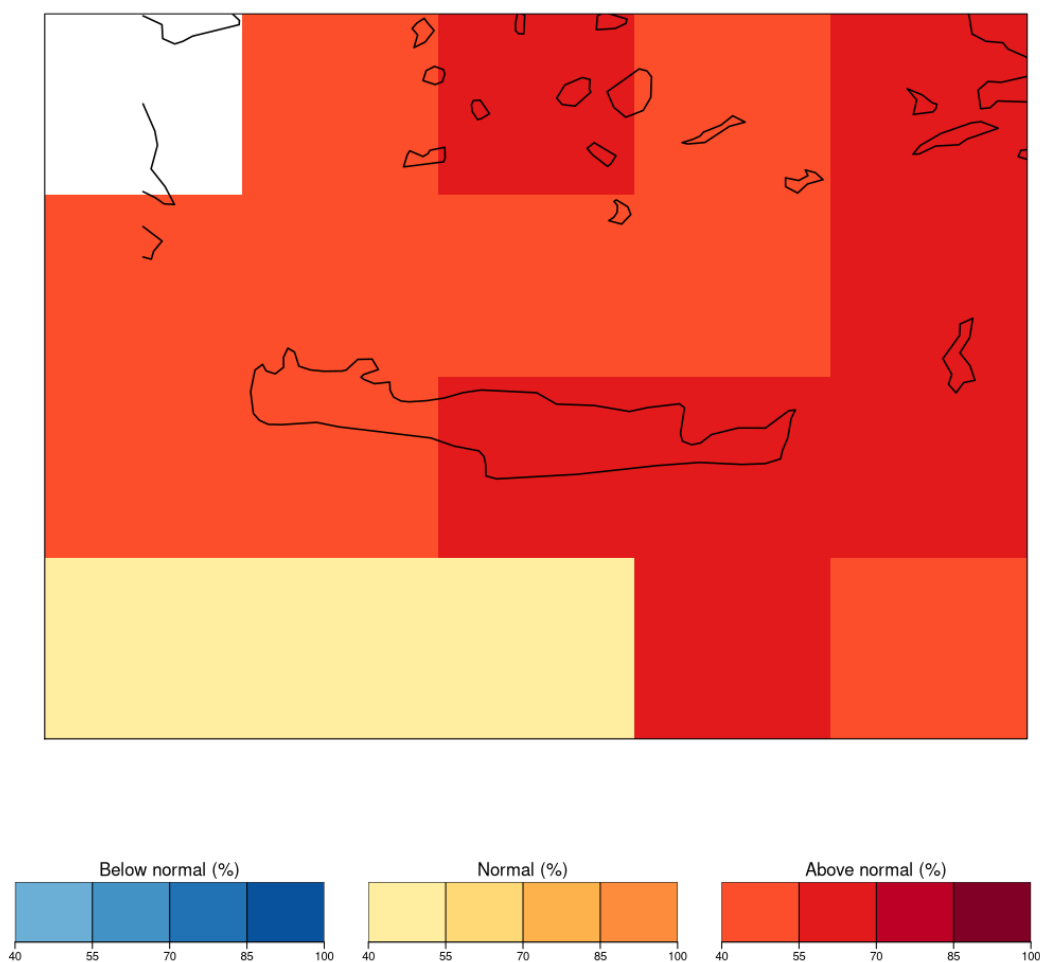
Όπως φαίνεται και από το **Χάρτη 4.17**, η πιθανότητα της βροχόπτωσης για το χειμώνα του 2023 είναι για τη δυτική Κρήτη πάνω του κανονικού με ποσοστό 40-55% και στην κεντρική, ανατολική κάτω του κανονικού με ποσοστό 40-55%. Επομένως αναμένεται ένας ξηρός χειμώνας για το μεγαλύτερο εύρος της Κρήτης, το οποίο επιβεβαιώνεται από τα δεδομένα σταθμών του **Πίνακα 4.5**. Επομένως υπάρχει μια αστοχία για το δυτικό κομμάτι της Κρήτης με βάση τα

δεδομένα βροχόπτωσης των σταθμών. Επομένως δεν μπορεί να θεωρηθεί τόσο επιτυχημένη πιθανολογική πρόγνωση για το χειμώνα του 2023.

Με βάση τα δεδομένα παρατήρησης ERA5 του **Πίνακα 4.6** για το χειμώνα του 2023, στο δυτικό κομμάτι του νησιού επικρατούν πάνω του κανονικού τιμές βροχόπτωσης στην πλειοψηφία. Στην κεντρική και ανατολική στην πλειοψηφία χαμηλότερες τιμές στου κανονικού. Επομένως επιβεβαιώνεται ο ισχυρισμός του **Χάρτη 4.17** για τον χειμώνα του 2023, αλλά αστοχεί για το μήνα Φεβρουάριο.

Πιθανολογική πρόγνωση των μηνών Μαρτίου-Απριλίου 2023

Most likely tercile tp ECMWFS5-March, April 2023 (1°)



Χάρτης 4.18: Πιθανότητα βροχόπτωσης κάτω του κανονικού, κανονικού και πάνω του κανονικού για τον Μάρτη, Απρίλη του 2023.

Όπως φαίνεται και από το **Χάρτη 4.18**, η πιθανότητα της βροχόπτωσης για τους μήνες Μάρτιος, Απρίλιος του 2023 είναι πάνω του κανονικού σε όλη την περιοχή της Κρήτη. Πιο συγκεκριμένα για τη δυτική έχει ποσοστό 40-55% και στην κεντρική, ανατολική έχει ποσοστό 55-70%. Επομένως για τους πρώτους

δύο μήνες της άνοιξης αναμένονται μεγάλες τιμές βροχόπτωσης σε όλη την ηπειρώτικη Κρήτη. Αυτό δεν επιβεβαιώνεται από τις τιμές βροχόπτωσης των σταθμών του **Πίνακα 4.5**, καθώς παρατηρούνται τιμές πάνω του κανονικού μόνο στο ανατολικό κομμάτι. Όμως οι τιμές στα ανατολικά και κεντρικά είναι εμφανώς μεγαλύτερες από αυτές του χειμώνα και σχετικά κοντά στις κανονικές. Επομένως μπορεί να θεωρηθεί μια επιτυχημένη πιθανολογική πρόγνωση.

Με βάση τα δεδομένα ERA5 του **Πίνακα 4.6** για το Μάρτιο-Απρίλιο του 2023 οι τιμές βροχόπτωσης ήταν πάνω του κανονικού στην πλειοψηφία τους, επομένως επιβεβαιώνεται ο ισχυρισμός του **Χάρτη 4.18**.

Ακόμα παρατηρούνται λευκά κελιά, αυτό σημαίνει ότι το κελί δεν μπορεί να αποδοθεί σαφώς σε κάποια κατηγορία. Αλλά δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα καθώς είναι εκτός της ηπειρώτικης Κρήτης.

Μήνας	Περιοχή	Συνολική Μηνιαία Βροχόπτωση (mm)	
		Περίοδου 1955-2010	Περίοδου 2022-2023
Δεκέμβριος	Ηράκλειο	85,6	4,2
	Σητεία	91,8	28
	Σούδα Χανιά	101,6	16,4
Ιανουάριος	Ηράκλειο	91,0	40
	Σητεία	92,6	62,2
	Σούδα Χανιά	129,5	103,4
Φεβρουάριος	Ηράκλειο	69,0	46,8
	Σητεία	71,0	71,0
	Σούδα Χανιά	104,0	60,4
Μάρτιος	Ηράκλειο	53,4	31,4
	Σητεία	49,0	49,0
	Σούδα Χανιά	76,0	33
Απρίλιος	Ηράκλειο	28,2	25,8
	Σητεία	23,3	23,8
	Σούδα Χανιά	31,5	28,4

Πίνακας 4.5: Συνολικές μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης σε επιλεγμένους σταθμούς, δεδομένα για την περίοδο 1955-2010 από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία και περίοδου 2022-2023 από το Meteo. Με **Bold** είναι οι τιμές της περιόδου 2022-2023 με μεγαλύτερη τιμή από της περιόδου 1955-2010.

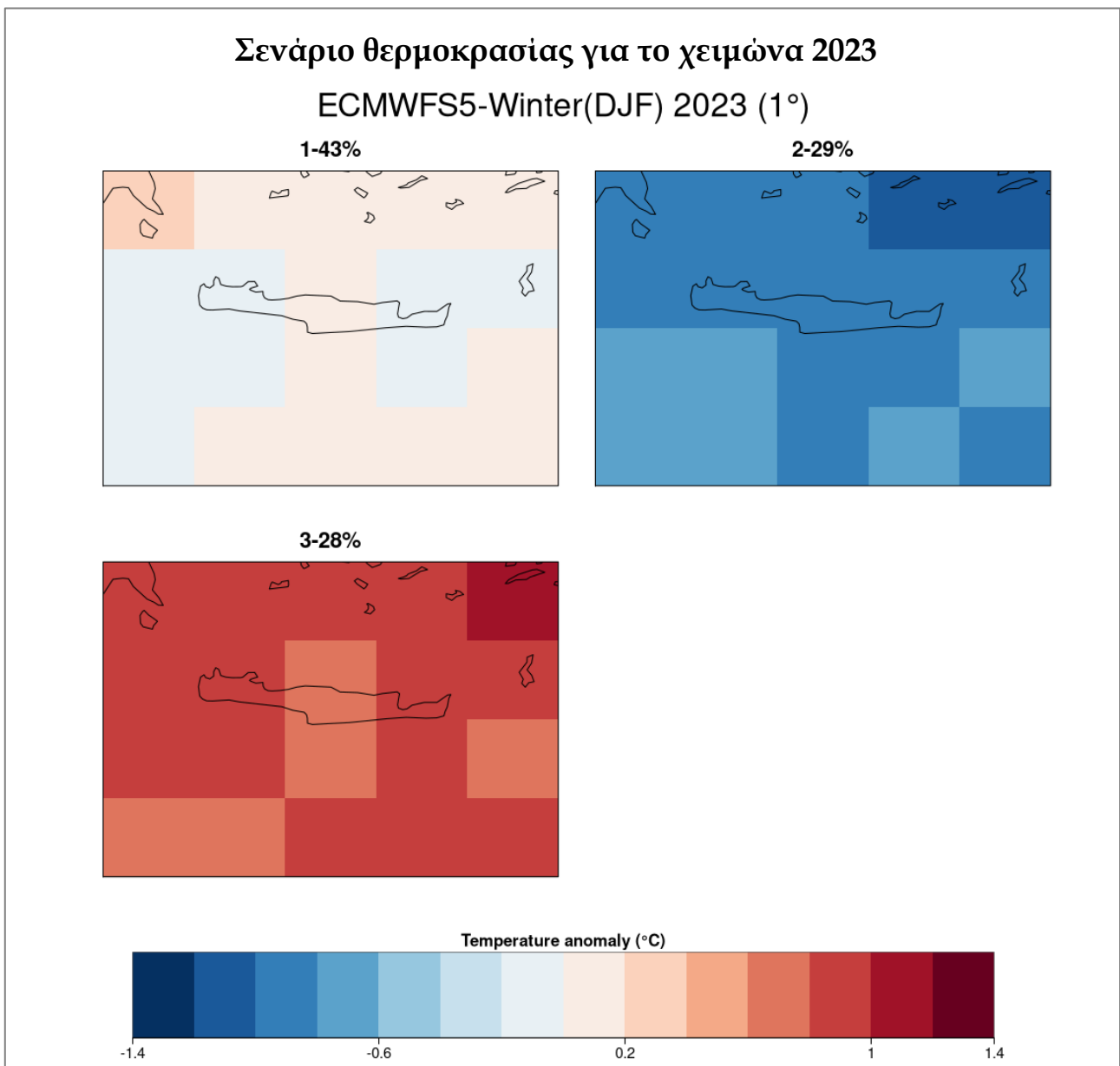
Μήνας	Συνολική Μηνιαία Βροχόπτωση (mm)			
	Περίοδος 1993-2023	Περίοδος 2022-2023		
	Κρήτη	Δυτική Κρήτη	Κεντρική Κρήτη	Ανατολική Κρήτη
Δεκέμβριος	71,2	47,4	27,3	15,9
Ιανουάριος	69,8	78,0	48,8	34,8
Φεβρουάριος	53,4	129,2	218,9	150,8
Μάρτιος	34,2	45,5	42,5	32,8
Απρίλιος	14,3	35,8	33,9	37,8

Πίνακας 4.6: Συνολικές μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης από ERA5, δεδομένα για την περίοδο 1993-2023 αφορούν όλη την Κρήτη και για την περίοδο 2022-2023 αφορά τη δυτική, κεντρική, ανατολική Κρήτη. Με **Bold** είναι οι τιμές της περιόδου 2022-2023 με μεγαλύτερη τιμή από της περιόδου 1993-2023.

4.5 Δημιουργία Σεναρίου Πρόγνωσης

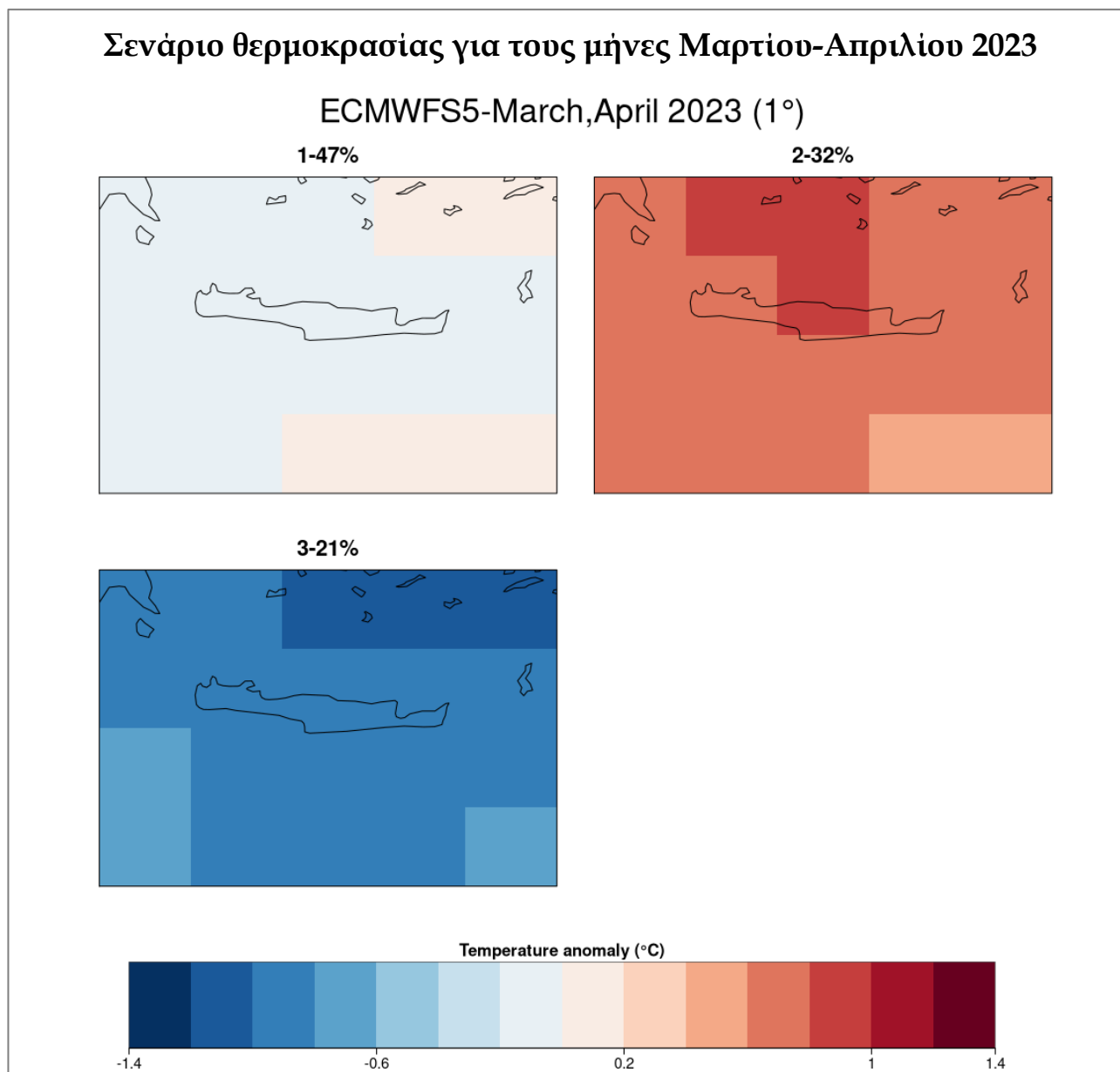
Χρησιμοποιηθήκαν οι προγνώσεις του συστήματος ECMWF System 5, που αρχικοποιούνται με την 1^η Οκτωβρίου του 2022. Ο στόχος είναι η εφαρμογή της πρόγνωσης για την ανάπτυξη πιθανού σεναρίου θερμοκρασίας και βροχόπτωσης για το χειμώνα του 2023, Δεκέμβριος-Φεβρουάριος (DJF), και για τους μήνες Μαρτίου-Απριλίου του 2023. Ουσιαστικά, τα μέλη δείγματα της πρόγνωσης ομαδοποιούνται, σύμφωνα με παρόμοια χαρακτηριστικά, και επιλέγεται το πιο αντιπροσωπευτικό μέλος κάθε συμπλέγματος.

4.5.1 Θερμοκρασία



Χάρτης 4.19: Σενάριο θερμοκρασίας για το χειμώνα (Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος) του 2023.

Ο **Χάρτης 4.19** παρουσιάζει τρία πιθανά σενάρια θερμοκρασίας για το χειμώνα (Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος) του 2023 που βασίζονται στα κοινά χαρακτηριστικά των members. Όπως φαίνεται το πιο επικρατέστερο σενάριο με ποσοστό 43% είναι εκείνο με κανονικές συνθήκες. Το δεύτερο με ποσοστό 29% έχει το πιο ψυχρό κλίμα. Τέλος, το τρίτο σενάριο με ποσοστό 28% είναι το πιο θερμό σενάριο. Όμως από το **Πίνακα 4.4**, που περιέχει δεδομένα σταθμών από διάφορες περιοχές της Κρήτη, φαίνεται ότι ο χειμώνας του 2023 ήταν θερμός. Επομένως το σενάριο που θα έπρεπε να επικρατεί είναι το τρίτο.

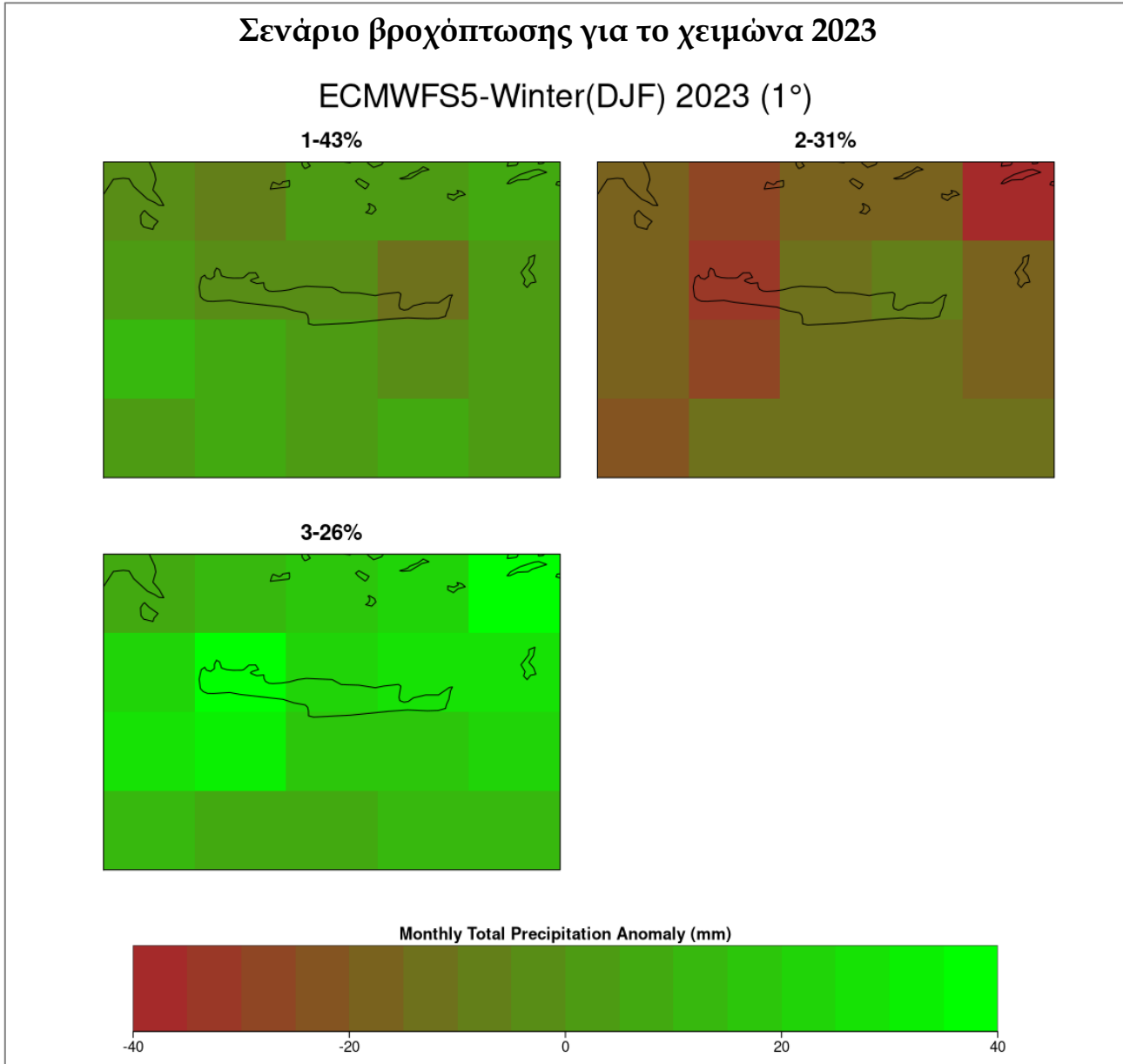


Χάρτης 4.20: Σενάριο θερμοκρασίας για τους μήνες Μαρτίου-Απριλίου του 2023.

Ο **Χάρτης 4.20** παρουσιάζει τρία πιθανά σενάρια θερμοκρασίας για τους μήνες Μαρτίου-Απριλίου του 2023, συνεπώς μπορεί να βρεθεί η τάση της άνοιξης. Όπως φαίνεται το πιο επικρατέστερο σενάριο με ποσοστό 47% έχει κανονικές

συνθήκες προς ψυχρές, αλλά χωρίς μεγάλη διακύμανση. Το δεύτερο με ποσοστό 32% είναι το πιο θερμό σενάριο. Τέλος, το τρίτο σενάριο με ποσοστό 21% είναι το πιο ψυχρό. Από τον Πίνακα 4.4 παρατηρείται μια διακύμανση των τιμών πάνω και κάτω του κανονικού για κάθε περιοχή. Επομένως η επικράτηση του σεναρίου ένα με ποσοστό 47% αντιπροσωπεύει την περίοδο.

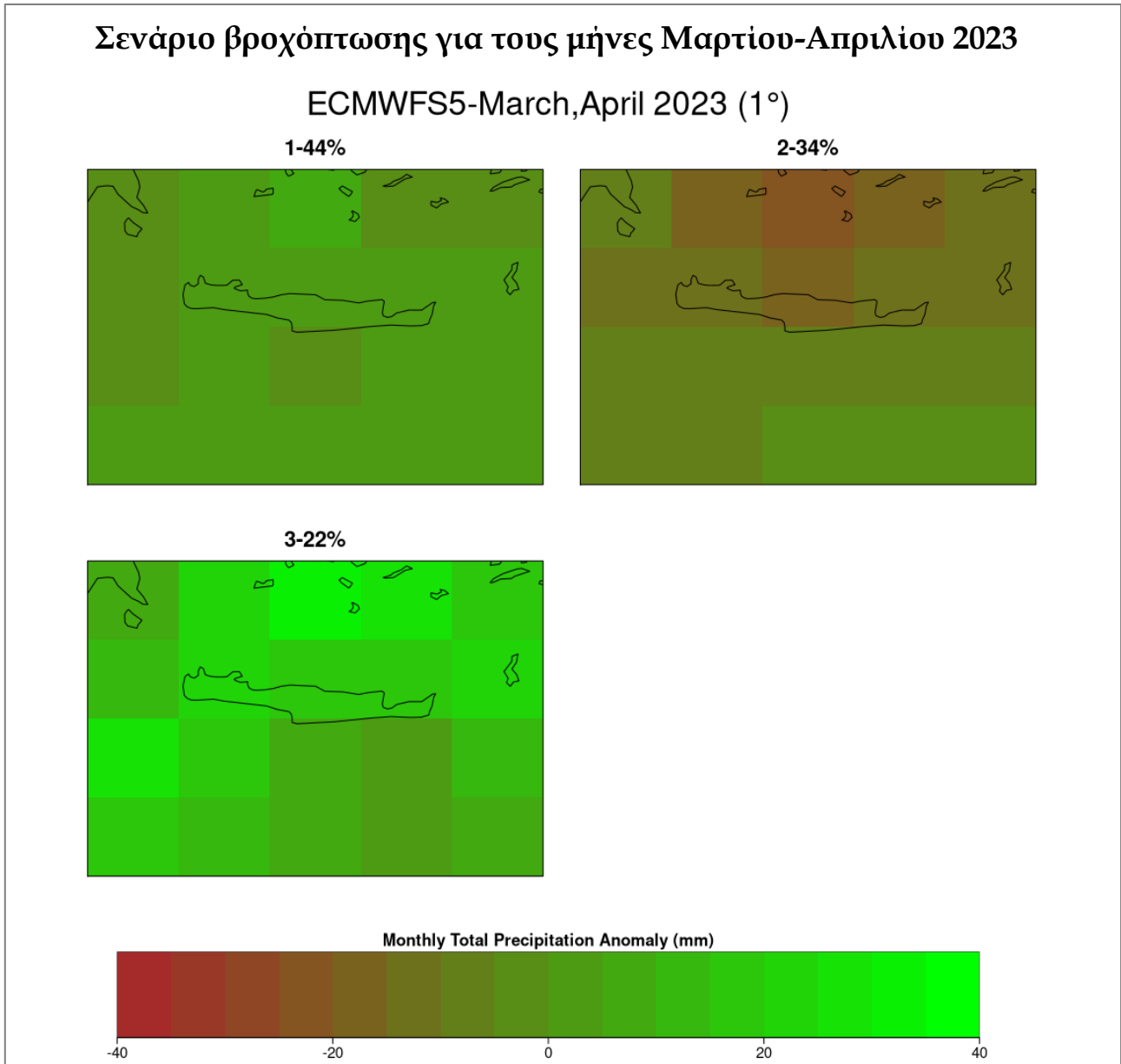
4.5.2 Βροχόπτωση



Χάρτης 4.21: Σενάριο βροχόπτωσης για το χειμώνα (Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος) του 2023.

Ο Χάρτης 4.21 παρουσιάζει τρία πιθανά σενάρια βροχόπτωσης για το χειμώνα (Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος) του 2023 που βασίζονται στα κοινά χαρακτηριστικά των μελών. Όπως φαίνεται το πιο επικρατέστερο σενάριο με

ποσοστό 43%, είναι εκείνο μιας περιόδου με κανονικές συνθήκες. Στο δεύτερο με ποσοστό 29% επικρατεί μια ξηρή περίοδος. Τέλος, το τρίτο σενάριο με ποσοστό 28% είναι η υγρή περίοδος. Όμως από τον **Πίνακα 4.5** που περιέχει δεδομένα σταθμών από διάφορες περιοχές της Κρήτη, φαίνεται ότι ο χειμώνας του 2023 ήταν ξηρός. Επομένως το σενάριο που θα έπρεπε να επικρατεί είναι το δεύτερο.



Χάρτης 4.22: Σενάριο βροχόπτωσης για τους μήνες Μαρτίου-Απριλίου του 2023.

Ο **Χάρτης 4.22** παρουσιάζει τρία πιθανά σενάρια βροχόπτωσης για τους μήνες Μαρτίου-Απριλίου του 2023. Όπως φαίνεται το πιο επικρατέστερο με ποσοστό 44% είναι εκείνο με κανονικές συνθήκες. Το δεύτερο με ποσοστό 34% είναι το σενάριο της ξηρής περιόδου. Τέλος, το τρίτο σενάριο με ποσοστό 22% είναι υγρή περίοδος. . Όμως από τον **Πίνακα 4.5** παρατηρείται μια διακύμανση των τιμών

πάνω και κάτω του κανονικού για κάθε περιοχή. Επομένως η επικράτηση του σεναρίου ένα με ποσοστό 44% αντιπροσωπεύει την περίοδο.

5

Συμπεράσματα και προτάσεις

Παρότι τη ραγδαία ανάπτυξη της εποχικής πρόγνωσης τα τελευταία 30 χρόνια από ακαδημαϊκά και ερευνητικά ακόμα ο βαθμός αξιοποίησής τους είναι μικρός. Αυτό προκύπτει από τη χαμηλή πιστότητα των συστημάτων εποχικής πρόγνωσης, με αποτέλεσμα η εφαρμογή τους να μην είναι τόσο διαδεδομένη. Ακόμα είναι σε πρώιμα στάδια ιδιαίτερα ότι αφορά την προγνωστική ικανότητα τοπικής κλίμακας, όπως η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας. Η εποχική πρόγνωση βασίζεται σε παράγοντες που εξελίσσονται μακροπρόθεσμα και σε μεγάλη κλίμακα, όπως το φαινόμενο της Βορειοατλαντικής Ταλάντωσης (NAO) που επηρεάζει τη θερμοκρασία της βόρειας Ευρώπης (Scaife et al. 2008). Η ικανότητα πρόγνωσης περιορίζεται όσο εστιάζεται σε τοπική κλίμακα ή σε συγκεκριμένες περιοχές, καθώς τα τοπικά χαρακτηριστικά παίζουν ρυθμιστικό ρόλο για το τοπικό κλίμα. Αλλά γενικότερα προβλήματα στη πρόγνωση έχει και η Ευρώπη καθώς τα συστήματα δεν είναι πάντα αντιπροσωπεύτητα (A. Weisheimer and Palmer 2014b). Χρειάζονται περισσότερες δοκιμές και βελτίωση στα υπάρχοντα συστήματα, ώστε να απεικονίζουν καλύτερα τα φαινόμενα που αφορούν την ήπειρο, όπως η Βορειοατλαντική Ταλάντωση (NAO) και τη σύζευξη μεταξύ της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας της γης.

Όσο αφορά την περιοχή της Κρήτης για την καλύτερη εφαρμογή των συστημάτων εποχικής πρόγνωσης μεταξύ των ECMWF System5 (ECMWF5) και το Meteo-France System6 (MFS6) επικρατέστερο είναι το πρώτο και για τη θερμοκρασία και για τη βροχόπτωση. Πιο συγκεκριμένα για την θερμοκρασία η καλύτερη απόδοση υπήρχε στην θερμή περίοδο (Μαΐου-Νοεμβρίου) με τιμές του συντελεστή ACC, μέγιστο συντελεστή συσχέτισης θετικής ανωμαλίας, να κυμαίνονται από 0,5 έως 0,9 με μέγιστη τιμή το 1 και στη ψυχρή περίοδος (Νοεμβρίου-Μαΐου) τιμές από 0,2 έως 0,6. Επιπλέον, για τη βροχόπτωση σε μια ξηρή περίοδο (Μαΐου-Νοεμβρίου) δεν είναι ξεκάθαρο το αποτέλεσμα καθώς επικρατεί ένας συνδυασμός των δυο συστημάτων, αλλά στο μεγαλύτερο μέρος της Κρήτης δεν αντιστοιχεί σε κάποιο από τα δυο συστήματα. Οι τιμές του συντελεστή ACC είναι πολύ μικρές και στα δύο συστήματα ECMWF5 και MFS6 με τιμές ACC 0,1 έως 0,3 και 0,1 έως 0,5 αντίστοιχα. Όμως για την υγρή περίοδο (Νοεμβρίου-Μαΐου) επικρατεί σε όλη τη Κρήτη το σύστημα ECMWF5 με τιμές ACC από 0,2 έως 0,6.

Στα βαθμονομημένα συστήματα τα μεροληπτικά σφάλματα έχουν μειωθεί σε τέτοιο βαθμό που θεωρούνται αμελητέα. Ιδιαίτερα για το σύστημα ECMWF5 τόσο στη θερμοκρασία όσο και στη βροχόπτωση έχει τις μικρότερες τιμές, επομένως θεωρείται αξιόπιστο για περεταίρω επεξεργασία. Ακόμα από την βιβλιογραφία επιβεβαιώνεται ο παραπάνω ισχυρισμός, καθώς για την περιοχή

των Άλπεων μετά την προσαρμογή της μεροληψίας, το ECMWFS5 έχει συγκρίσιμη ακρίβεια με τα δεδομένα ERA5 και το MFS6 έχει υπολειπόμενα συστηματικά σφάλματα που επηρεάζουν την αξιοπιστία των προσομοιώσεων (Terzago, Bongiovanni, and Von Hardenberg 2023).

Ο καταβιβασμός της κλίμακας, είναι ένα θεμελιώδες βήμα για τη μετατροπή των προσομοιώσεων κλίματος από την αρχική ανάλυση τους στην λεπτότερη ανάλυση και είναι απαραίτητος για μια περιοχή όπως η Κρήτη. Για τη θερμοκρασία ο καταβιβασμός έγινε για το καλοκαίρι 2003, το πιο θερμό της περιόδου 1993-2016 που επικρατούσε καύσωνας σε όλη την Ευρώπη, από ανάλυση 1° του αρχικού συστήματος ECMWFS5 σε $0,25^\circ$ με εφαρμογή της ορογραφίας και της κλιματολογίας της περιοχής. Αναμεσά στους δυο τρόπους καταβιβασμού υπάρχουν διαφορές στα τελικά αποτελέσματα. Ιδιαίτερα σε περιοχές με ορεινούς όγκους, γενικότερα φαίνεται μια αδυναμία στα συστήματα να υπολογίσουν με ακρίβεια τις ψυχρές τιμές θερμοκρασίας. Ενώ για τη βροχόπτωση ο καταβιβασμός πραγματοποιήθηκε για το φθινοπώρον του 2002, το πιο υγρό της περιόδου 1993-2016, από ανάλυση 1° του αρχικού συστήματος ECMWFS5 σε $0,05^\circ$. Θεωρούνται αξιόπιστα τα αποτελέσματα της πρόγνωσης καθώς ταιριάζουν με τα δεδομένα επανα-ανάλυσης ERA5. Παρατηρείται μια έμφαση στη βροχόπτωση στο δυτικό και κεντρικό κομμάτι της Κρήτης και στα ανατολικά μειωμένες βροχοπτώσεις έως και καθόλου. Το οποίο ανταποκρίνεται πλήρως στην γενικότερη τάση για βροχόπτωση της περιοχής.

Για τις πιθανολογικές προγνώσεις της θερμοκρασίας, για την σωστή αξιολόγηση των αποτελεσμάτων θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν η αυξητική τάση της θερμοκρασίας λόγω της κλιματικής αλλαγής. Αρχικοποιήθηκαν με τα δεδομένα εποχικής πρόγνωσης ECMWFS5 με αρχική ημερομηνία τη 1^η Οκτώβριου 2022, για το πρόβλεψη του χειμώνα ήταν από δυο έως τέσσερις μήνες πριν και για τους δυο πρώτους μήνες της άνοιξης από πέντε με έξι μήνες. Με αυτό το γνώμονα, οι πιθανότητες στη δυτική και κεντρική Κρήτη 40-55% και στην ανατολική 55-70% πάνω του κανονικού για τη θερμοκρασία αντιπροσωπεύουν την γενικότερη αίσθηση της περιόδου του χειμώνα του 2023, ενός θερμού χειμώνα, αλλά και της άνοιξης. Για τους δυο πρώτους μήνες της άνοιξης του 2023, οι πιθανότητες ήταν στη δυτική και κεντρική 40-55% κανονική και στην ανατολική 40-55% πάνω του κανονικού. Επιπλέον, για τη βροχόπτωση των ίδιων περιόδων προκύπτει ότι ο χειμώνας του 2023 θα ήταν ξηρός με πιθανότητα στη δυτική Κρήτη 40-55% πάνω του κανονικού και στην κεντρική, ανατολική 40-55% κάτω του κανονικού, το οποίο επιβεβαιώθηκε εκ των υστέρων από τις παρατηρήσεις. Τέλος, για τους δυο πρώτους μήνες της άνοιξης παρατηρείται αύξηση των βροχοπτώσεων με ποσοστά στα δυτικά 40-55% πάνω του κανονικού και στα κεντρικά, ανατολικά 55-70% πάνω του κανονικού, που και αυτό επιβεβαιώθηκε.

Όσο αφορά τα σενάρια δεν θεωρούνται τόσο επιτυχημένα, καθώς για το χειμώνα του 2023 για τη θερμοκρασία και για τη βροχόπτωση τα σενάρια δεν ήταν αντιπροσωπευτικά των πραγματικών συνθηκών που λήφθηκαν από του

τοπικούς μετεωρολογικούς σταθμούς, ενώ για τους δυο πρώτους μήνες της άνοιξης θεωρούνται αξιόπιστο.

Μέσα από την παρούσα διπλωματική εργασία διαπιστώθηκε ότι η εποχιακή πρόγνωση αξιοποιείται ακόμα σε μικρό βαθμό λόγω της χαμηλής πιστότητας της, αλλά και της δυσχερούς επεξεργασίας των δεδομένων πρόγνωσης. Ακόμα, για την πρόγνωση της θερμοκρασίας για μια θερμή περίοδο το σύστημα ECMWF5 έχει καλή αντιστοιχία με την πραγματικότητα και αντίστοιχα για μια υγρή περίοδο για την βροχόπτωση. Το σύστημα MFS6 δεν είχε κάποια ιδιαίτερη συσχέτιση με την περιοχή της Κρήτης. Ακόμα, από την βιβλιογραφία βρέθηκε ότι σε σύγκριση με το ECMWF5 το MFS6 παρέχει λιγότερο δεξιότητες και οι επιδόσεις εξαρτώνται περισσότερο από τη βαθμονόμηση, την εποχή, το πείραμα και το σταθμό (Terzago, Bongiovanni, and Von Hardenberg 2023). Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την πιθανή χρησιμότητα της εποχικής πρόγνωσης, ιδιαίτερα για την διαχείριση υδατικών πόρων, καθώς μπορεί να εκτιμηθεί με σχετική ακρίβεια η ποσότητα νερού που διατίθεται από μια υγρή περίοδο. Όμως, παρατηρήθηκε αδυναμία των συστημάτων πρόγνωσης για τη ξηρή περίοδο, Μαΐου-Νοεμβρίου, συνεπώς υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης των συστημάτων όσο αφορά την προβλεψιμότητα και την καλύτερη προσομοίωση φαινόμενα που σχετίζονται όχι μόνο την Κρήτη, αλλά και γενικότερα την Ευρώπη. Τέλος, λόγω της περιορισμένης έκτασης της περιοχής, τα ευρήματα αυτής της εργασίας δεν μπορούν να επεκταθούν πέρα από την περιοχή μελέτης.

Μια μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στην περαιτέρω χρήση ενός αρκετά λεπτομερέστερου συνόλου δεδομένων παρατήρησης για τη βαθμονόμηση του συστήματος, π.χ. το Chelsa, ή τοπικές παρατηρήσεις. Ακόμα μπορεί να εστιάσει στα νέα μοντέλα των συστημάτων εποχής πρόγνωσης, για το πώς αυτά ανταποκρίνονται στη τοπική κλίμακα της περιοχής μελέτης.

Βιβλιογραφία

- A. M. Selvam. 2007. 'Chaotic Climate Dynamics'. 2007. https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=qIm9d03LWScC&oi=fnd&pg=PA1&dq=+chaotic+nature+of+the+climate+system&ots=5Nf4XDXZno&sig=ZCDIaVDcliv6GBGnrwFlvIXVk78&redir_esc=y#v=onepage&q=chaotic+nature+of+the+climate+system&f=false.
- alaingradot. 2017. 'Copernicus Climate Change Service Documentation of the METEO-FRANCE Pre-Operational Seasonal Forecasting System'.
- Andriotis, Konstantinos. 2006. 'Researching the Development Gap between the Hinterland and the Coast - Evidence from the Island of Crete'. *Tourism Management* 27 (4): 629–39. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2005.02.005>.
- Ash, Andrew, Peter McIntosh, Brendan Cullen, Peter Carberry, Mark Stafford Smith, Andrew Ash, Peter McIntosh, Brendan Cullen, Peter Carberry, and Mark Stafford Smith. 2007. 'Constraints and Opportunities in Applying Seasonal Climate Forecasts in Agriculture'. *Australian Journal of Agricultural Research* 58 (10): 952–65. <https://doi.org/10.1071/AR06188>.
- Bader, Jean Claude, Jean Philippe Pielieuvre, and Jean Pierre Lamagat. 2006. 'Prévision Saisonnière Du Volume de Crue Du Fleuve Sénégal: Utilisation Des Résultats Du Modèle ARPEGE Climat'. *Hydrological Sciences Journal* 51 (3): 406–17. <https://doi.org/10.1623/hysj.51.3.406>.
- Barnes, Elizabeth A, Andrea Lang, Paul Dirmeyer, Kathleen Pegion, Edmund Chang, and Annarita Mariotti. 2018. 'Outcomes from the Subseasonal-to-Seasonal (S2S) Prediction Task Force Report Main Authors MAPP S2S TASK FORCE TECHNICAL REPORT'. <https://doi.org/10.25923/795y-kn97>.
- Behera, Swadhin, Jayanthi V. Ratnam, Yukio Masumoto, and Toshio Yamagata. 2013. 'Origin of Extreme Summers in Europe: The Indo-Pacific Connection'. *Climate Dynamics* 41 (3–4): 663–76. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1524-8>.
- Bellprat, O., S. Kotlarski, D. Lüthi, and C. Schär. 2013. 'Physical Constraints for Temperature Biases in Climate Models'. *Geophysical Research Letters* 40 (15): 4042–47. <https://doi.org/10.1002/grl.50737>.
- Brands, Swen. 2017. 'Which ENSO Teleconnections Are Robust to Internal Atmospheric Variability?' *Geophysical Research Letters* 44 (3): 1483–93. <https://doi.org/10.1002/2016GL071529>.
- Cane, Mark A., Stephen E. Zebiak, and Sean C. Dolan. 1986. 'Experimental Forecasts of El Niño'. *Nature* 321:6073 321 (6073): 827–32. <https://doi.org/10.1038/321827a0>.

- Cassou, Christophe, Laurent Terray, and Adam S Phillips. 2005. 'LETTER Tropical Atlantic Influence on European Heat Waves'.
- 'Charts | Copernicus'. 2023. Accessed 26 June 2023. https://climate.copernicus.eu/charts/packages/c3s_seasonal/products/c3s_seasonal_spatial_lfpw_2mtm_3m?area=area08&base_time=202306010000&type=tsum&valid_time=202307010000.
- Chartzoulakis, K S, N V Paranychianakis, and A N Angelakis. 2001. 'Water Resources Management in the Island of Crete, Greece, with Emphasis on the Agricultural Use'. *Water Policy*. Vol. 3.
- 'Climate Variability: North Atlantic Oscillation | NOAA Climate.Gov'. 2009. Accessed 11 July 2023. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-north-atlantic-oscillation>.
- Cogato, Alessia, Franco Meggio, Massimiliano De Antoni Migliorati, and Francesco Marinello. 2019. 'Extreme Weather Events in Agriculture: A Systematic Review'. *Sustainability (Switzerland)* 11 (9): 1–18. <https://doi.org/10.3390/su11092547>.
- Cohen, Judah, James A. Screen, Jason C. Furtado, Mathew Barlow, David Whittleston, Dim Coumou, Jennifer Francis, et al. 2014. 'Recent Arctic Amplification and Extreme Mid-Latitude Weather'. *Nature Geoscience*. Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/ngeo2234>.
- Costa-Saura, J. M., V. Mereu, M. Santini, A. Trabucco, D. Spano, and V. Bacciu. 2022. 'Performances of Climatic Indicators from Seasonal Forecasts for Ecosystem Management: The Case of Central Europe and the Mediterranean'. *Agricultural and Forest Meteorology* 319 (May). <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108921>.
- 'CRAN - Package Ncdf4'. n.d. Accessed 27 January 2023. <https://cran.r-project.org/web/packages/ncdf4/index.html>.
- Déqué, M. 1997. 'Ensemble Size for Numerical Seasonal Forecasts'. *Tellus A* 49 (1): 74–86. <https://doi.org/10.1034/J.1600-0870.1997.00005.X>.
- Deyà Tortella, Bartolomé, and Dolores Tirado. 2011. 'Hotel Water Consumption at a Seasonal Mass Tourist Destination. The Case of the Island of Mallorca'. *Journal of Environmental Management* 92 (10): 2568–79. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.05.024>.
- Dinku, Tufa, Chris Funk, Pete Peterson, Ross Maidment, Tsegaye Tadesse, Hussein Gadain, and Pietro Ceccato. 2018. 'Validation of the CHIRPS Satellite Rainfall Estimates over Eastern Africa'. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 144 (November): 292–312. <https://doi.org/10.1002/qj.3244>.
- Doblas-Reyes, F. J., R. Hagedorn, T. N. Palmer, and J. J. Morcrette. 2006. 'Impact of Increasing Greenhouse Gas Concentrations in Seasonal Ensemble Forecasts'. *Geophysical Research Letters* 33 (7). <https://doi.org/10.1029/2005GL025061>.

- Doblas-Reyes, Francisco J., Javier García-Serrano, Fabian Lienert, Aida Pintó Biescas, and Luis R.L. Rodrigues. 2013. 'Seasonal Climate Predictability and Forecasting: Status and Prospects'. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 4 (4): 245–68. <https://doi.org/10.1002/WCC.217>.
- Doblas-Reyes, Francisco J., Renate Hagedorn, and T. N. Palmer. 2005. 'The Rationale behind the Success of Multi-Model Ensembles in Seasonal Forecasting - II. Calibration and Combination'. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 57 (3): 234–52. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2005.00104.x>.
- D'Onofrio, D., E. Palazzi, J. Von Hardenberg, A. Provenzale, and S. Calmanti. 2014. 'Stochastic Rainfall Downscaling of Climate Models'. *Journal of Hydrometeorology* 15 (2): 830–43. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-096.1>.
- Douville, Hervé. 2010. 'Relative Contribution of Soil Moisture and Snow Mass to Seasonal Climate Predictability: A Pilot Study'. *Climate Dynamics* 34 (6): 797–818. <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0508-1>.
- Dubus, Laurent, Shylesh Muralidharan, and Alberto Troccoli. 2018. 'What Does the Energy Industry Require from Meteorology?' *Weather and Climate Services for the Energy Industry*, January, 41–63. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68418-5_4/FIGURES/5.
- 'Dynamics of Weather Regimes: Quasi-Stationary Waves and Blocking in: Monthly Weather Review Volume 110 Issue 9 (1982)'. n.d. Accessed 25 June 2023. https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/110/9/1520-0493_1982_110_1105_dowrqs_2_0_co_2.xml.
- Eade, Rosie, Doug Smith, Adam Scaife, Emily Wallace, Nick Dunstone, Leon Hermanson, and Niall Robinson. 2014. 'Do Seasonal-to-Decadal Climate Predictions Underestimate the Predictability of the Real World?' *Geophysical Research Letters* 41 (15): 5620–28. <https://doi.org/10.1002/2014GL061146>.
- Feldman, David L., and Helen M. Ingram. 2009. 'Making Science Useful to Decision Makers: Climate Forecasts, Water Management, and Knowledge Networks'. *Weather, Climate, and Society* 1 (1): 9–21. <https://doi.org/10.1175/2009WCAS1007.1>.
- Fischer, E. M., S. I. Seneviratne, P. L. Vidale, D. Lüthi, and C. Schär. 2007. 'Soil Moisture-Atmosphere Interactions during the 2003 European Summer Heat Wave'. *Journal of Climate* 20 (20): 5081–99. <https://doi.org/10.1175/JCLI4288.1>.
- Fischer, Erich M., S. I. Seneviratne, D. Lüthi, and C. Schär. 2007. 'Contribution of Land-Atmosphere Coupling to Recent European Summer Heat Waves'. *Geophysical Research Letters* 34 (6). <https://doi.org/10.1029/2006GL029068>.
- Grillakis, Manolis G., Georgios Doupis, Evangelos Kapetanakis, and Eleni Goumenaki. 2022. 'Future Shifts in the Phenology of Table Grapes on Crete

- under a Warming Climate'. *Agricultural and Forest Meteorology* 318 (May): 108915. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2022.108915>.
- Hagedorn, Renate, Francisco J. Doblas-Reyes, and T. N. Palmer. 2005. 'The Rationale behind the Success of Multi-Model Ensembles in Seasonal Forecasting – I. Basic Concept'. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 57 (3): 219. <https://doi.org/10.3402/TELLUSA.V57I3.14657>.
- Haylock, M. R., N. Hofstra, A. M.G. Klein Tank, E. J. Klok, P. D. Jones, and M. New. 2008. 'A European Daily High-Resolution Gridded Data Set of Surface Temperature and Precipitation for 1950-2006'. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 113 (20). <https://doi.org/10.1029/2008JD010201>.
- Hazeleger, W., X. Wang, C. Severijns, S. Ștefănescu, R. Bintanja, A. Sterl, K. Wyser, et al. 2012. 'EC-Earth V2.2: Description and Validation of a New Seamless Earth System Prediction Model'. *Climate Dynamics* 39 (11): 2611–29. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1228-5>.
- Hemri, Stephan, Jonas Bhend, Mark A. Liniger, Rodrigo Manzananas, Stefan Siebert, David B. Stephenson, José M. Gutiérrez, Anca Brookshaw, and Francisco J. Doblas-Reyes. 2020. 'How to Create an Operational Multi-Model of Seasonal Forecasts?' *Climate Dynamics* 55 (5–6): 1141–57. <https://doi.org/10.1007/S00382-020-05314-2/FIGURES/6>.
- Hersbach, Hans, Bill Bell, Paul Berrisford, Shoji Hirahara, András Horányi, Joaquín Muñoz-Sabater, Julien Nicolas, et al. 2020. 'The ERA5 Global Reanalysis'. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146 (730): 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/QJ.3803>.
- Hirth, Lion. 2013. 'The Market Value of Variable Renewables: The Effect of Solar Wind Power Variability on Their Relative Price'. *Energy Economics* 38 (July): 218–36. <https://doi.org/10.1016/J.ENERCO.2013.02.004>.
- Huffman, George J., Robert F. Adler, David T. Bolvin, Guojun Gu, Eric J. Nelkin, Kenneth P. Bowman, Yang Hong, Erich F. Stocker, and David B. Wolff. 2007. 'The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales'. *Journal of Hydrometeorology* 8 (1): 38–55. <https://doi.org/10.1175/JHM560.1>.
- Jaeger, E. B., and S. I. Seneviratne. 2011. 'Impact of Soil Moisture-Atmosphere Coupling on European Climate Extremes and Trends in a Regional Climate Model'. *Climate Dynamics* 36 (9–10): 1919–39. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0780-8>.
- Jin, Emilia K., James L. Kinter, B. Wang, C. K. Park, I. S. Kang, B. P. Kirtman, J. S. Kug, et al. 2008. 'Current Status of ENSO Prediction Skill in Coupled Ocean-Atmosphere Models'. *Climate Dynamics* 31 (6): 647–64. <https://doi.org/10.1007/S00382-008-0397-3/FIGURES/11>.
- Johnson, Stephanie J., Timothy N. Stockdale, Laura Ferranti, Magdalena A. Balmaseda, Franco Molteni, Linus Magnusson, Steffen Tietsche, et al. 2019.

- ‘SEAS5: The New ECMWF Seasonal Forecast System’. *Geoscientific Model Development* 12 (3): 1087–1117. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1087-2019>.
- Kim, Hye Mi, Peter J. Webster, and Judith A. Curry. 2012. ‘Seasonal Prediction Skill of ECMWF System 4 and NCEP CFSv2 Retrospective Forecast for the Northern Hemisphere Winter’. *Climate Dynamics* 39 (12): 2957–73. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1364-6>.
- Koutroulis, Aristeidis G., Ioannis K. Tsanis, Ioannis N. Daliakopoulos, and Daniela Jacob. 2013. ‘Impact of Climate Change on Water Resources Status: A Case Study for Crete Island, Greece’. *Journal of Hydrology* 479 (February): 146–58. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2012.11.055>.
- Kutiel, H, and Y Benaroch. n.d. ‘North Sea-Caspian Pattern (NCP) ± an Upper Level Atmospheric Teleconnection Affecting the Eastern Mediterranean: Identification and Definition’.
- Lambrakis, N J. 1998. ‘The Impact of Human Activities in the Malia Coastal Area (Crete) on Groundwater Quality’. *Cases and Solutions Environmental Geology*. Vol. 36. Springer-Verlag.
- Lledó, Ll, V. Torralba, A. Soret, J. Ramon, and F. J. Doblas-Reyes. 2019. ‘Seasonal Forecasts of Wind Power Generation’. *Renewable Energy* 143 (December): 91–100. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.04.135>.
- Lledó, Llorenç, Omar Bellprat, Francisco J. Doblas-Reyes, and Albert Soret. 2018. ‘Investigating the Effects of Pacific Sea Surface Temperatures on the Wind Drought of 2015 Over the United States’. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 123 (10): 4837–49. <https://doi.org/10.1029/2017JD028019>.
- ‘M3.2_high_quality_climate_prediction_v1.2.Pdf - Google Drive’. n.d. Accessed 22 June 2023. <https://drive.google.com/file/d/1qp2gbtKdBl4XmsyOeaEhFENwpeUuJwkf/view>.
- Malagò, Anna, Dionissios Efstathiou, Fayçal Bouraoui, Nikolaos P. Nikolaidis, Marco Franchini, Giovanni Bidoglio, and Marinos Kritsotakis. 2016. ‘Regional Scale Hydrologic Modeling of a Karst-Dominant Geomorphology: The Case Study of the Island of Crete’. *Journal of Hydrology*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.061>.
- Manubens, Nicolau, Louis Philippe Caron, Alasdair Hunter, Omar Bellprat, Eleftheria Exarchou, Neven S. Fučkar, Javier Garcia-Serrano, et al. 2018a. ‘An R Package for Climate Forecast Verification’. *Environmental Modelling and Software* 103: 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.01.018>.
- — —. 2018b. ‘An R Package for Climate Forecast Verification’. *Environmental Modelling and Software* 103 (May): 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.01.018>.
- Maraun, D., F. Wetterhall, A. M. Ireson, R. E. Chandler, E. J. Kendon, M. Widmann, S. Bienen, et al. 2010. ‘Precipitation Downscaling under

- Climate Change: Recent Developments to Bridge the Gap between Dynamical Models and the End User'. *Reviews of Geophysics* 48 (3). <https://doi.org/10.1029/2009RG000314>.
- Maraun, Douglas, and Martin Widmann. 2017. 'Statistical Downscaling and Bias Correction for Climate Research'. *Statistical Downscaling and Bias Correction for Climate Research*, January. <https://doi.org/10.1017/9781107588783>.
- Markonis, Y., A. N. Angelakis, J. Christy, and D. Koutsoyiannis. 2016. 'Climatic Variability and the Evolution of Water Technologies in Crete, Hellas'. *Water History* 8 (2): 137–57. <https://doi.org/10.1007/s12685-016-0159-9>.
- 'Medscope (689029) Milestone M3.2'. n.d.
- Meehl, Gerald A., Jadwiga H. Richter, Haiyan Teng, Antonietta Capotondi, Kim Cobb, Francisco Doblas-Reyes, Markus G. Donat, et al. 2021. 'Initialized Earth System Prediction from Subseasonal to Decadal Timescales'. *Nature Reviews Earth and Environment* 2 (5): 340–57. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00155-x>.
- Merryfield, William J., Johanna Baehr, Lauriane Batté, Emily J. Becker, Amy H. Butler, Caio A.S. Coelho, Gokhan Danabasoglu, et al. 2020. 'Current and Emerging Developments in Subseasonal to Decadal Prediction'. *Bulletin of the American Meteorological Society* 101 (6): E869–96. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0037.1>.
- Meza, Francisco J., James W. Hansen, and Daniel Osgood. 2008. 'Economic Value of Seasonal Climate Forecasts for Agriculture: Review of Ex-Ante Assessments and Recommendations for Future Research'. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47 (5): 1269–86. <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1540.1>.
- Mishra, Niti, Chloé Prodhomme, and Virginie Guemas. 2019a. 'Multi-Model Skill Assessment of Seasonal Temperature and Precipitation Forecasts over Europe'. *Climate Dynamics* 52 (7–8): 4207–25. <https://doi.org/10.1007/S00382-018-4404-Z/METRICS>.
- — —. 2019b. 'Multi-Model Skill Assessment of Seasonal Temperature and Precipitation Forecasts over Europe'. *Climate Dynamics* 52 (7–8): 4207–25. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4404-z>.
- Molteni, Franco, Tim Stockdale, Magdalena Balmaseda, Gianpaolo Balsamo, Roberto Buizza, Laura Ferranti, Linus Magnusson, Kristian Mogensen, and Tim Palmer. 2011. 'The New ECMWF Forecast System (System 4)', no. November.
- Morianou, G. G., N. N. Kourgialas, G. Psarras, and G. C. Koubouris. 2018. 'Mapping Sensitivity to Desertification in Crete (Greece), the Risk for Agricultural Areas'. *Journal of Water and Climate Change* 9 (4): 691–702. <https://doi.org/10.2166/wcc.2018.148>.

- Nicholls, Neville. 1999. 'Cognitive Illusions, Heuristics, and Climate Prediction'. *Bulletin of the American Meteorological Society* 80 (7): 1385–97. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<1385:CIHACP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<1385:CIHACP>2.0.CO;2).
- Palmer, T. N., and D. L.T. Anderson. 1994. 'The Prospects for Seasonal Forecasting – A Review Paper'. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 120 (518): 755–93. <https://doi.org/10.1002/QJ.49712051802>.
- Pérez-Zanón, Núria, Louis-Philippe Caron, Silvia Terzago, Bert Van Schaeybroeck, Llorenç Lledó, Nicolau Manubens, Emmanuel Roulin, et al. 2022. 'Climate Services Toolbox (CSTools) v4.0: From Climate Forecasts to Climate Forecast Information'. *Geoscientific Model Development* 15 (15): 6115–42. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-6115-2022>.
- Quesada, Benjamin, Robert Vautard, Pascal Yiou, Martin Hirschi, and Sonia I. Seneviratne. 2012. 'Asymmetric European Summer Heat Predictability from Wet and Dry Southern Winters and Springs'. *Nature Climate Change* 2 (10): 736–41. <https://doi.org/10.1038/nclimate1536>.
- Ramon, Jaume, Llorenç Lledó, Pierre Antoine Bretonniere, Margarida Samsó, and Francisco J. Doblas-Reyes. 2021. 'A Perfect Prognosis Downscaling Methodology for Seasonal Prediction of Local-Scale Wind Speeds'. *Environmental Research Letters* 16 (5): 054010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ABE491>.
- Rodwell, M J, D P Rowell, and C K Folland. 1999. 'Oceanic Forcing of the Wintertime North Atlantic Oscillation and European Climate'. www.nature.com.
- Rogers, Jeffrey C. 1997. 'North Atlantic Storm Track Variability and Its Association to the North Atlantic Oscillation and Climate Variability of Northern Europe'.
- Rössler, O., A. M. Fischer, H. Huebener, D. Maraun, R. E. Benestad, P. Christodoulides, P. M.M. Soares, et al. 2019. 'Challenges to Link Climate Change Data Provision and User Needs: Perspective from the COST-Action VALUE'. *International Journal of Climatology* 39 (9): 3704–16. <https://doi.org/10.1002/JOC.5060>.
- Scaife, Adam A., Dan Copsey, Chris Gordon, Chris Harris, Tim Hinton, Sarah Keeley, Alan O'Neill, Malcolm Roberts, and Keith Williams. 2011. 'Improved Atlantic Winter Blocking in a Climate Model'. *Geophysical Research Letters* 38 (23). <https://doi.org/10.1029/2011GL049573>.
- Scaife, Adam A., Chris K. Folland, Lisa V. Alexander, Anders Moberg, and Jeff R. Knight. 2008. 'European Climate Extremes and the North Atlantic Oscillation'. *Journal of Climate* 21 (1): 72–83. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1631.1>.
- Schär, Christoph, Schär, Daniel, Lüthi, Urs, Beyerle, and Erdmann Heise. n.d. 'The Soil-Precipitation Feedback: A Process Study with a Regional Climate Model'.

- Schaeybroeck, B. Van, and S. Vannitsem. 2011. 'Post-Processing through Linear Regression'. *Nonlinear Processes in Geophysics* 18 (2): 147–60. <https://doi.org/10.5194/NPG-18-147-2011>.
- Schaeybroeck, Bert Van, and Stéphane Vannitsem. 2015a. 'Ensemble Post-Processing Using Member-by-Member Approaches: Theoretical Aspects'. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 141 (688): 807–18. <https://doi.org/10.1002/QJ.2397>.
- — —. 2015b. 'Ensemble Post-Processing Using Member-by-Member Approaches: Theoretical Aspects'. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 141 (688): 807–18. <https://doi.org/10.1002/qj.2397>.
- 'Schematic Diagrams | El Nino Theme Page - A Comprehensive Resource'. 2016. Accessed 24 March 2023. <https://www.pmel.noaa.gov/elnino/schematic-diagrams>.
- Seneviratne, Sonia I., Thierry Corti, Edouard L. Davin, Martin Hirschi, Eric B. Jaeger, Irene Lehner, Boris Orłowsky, and Adriaan J. Teuling. 2010. 'Investigating Soil Moisture-Climate Interactions in a Changing Climate: A Review'. *Earth-Science Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>.
- Seneviratne, Sonia I., Daniel Lüthi, Michael Litschi, and Christoph Schär. 2006. 'Land-Atmosphere Coupling and Climate Change in Europe'. *Nature* 443 (7108): 205–9. <https://doi.org/10.1038/nature05095>.
- Shaman, Jeffrey, and Eli Tziperman. 2011. 'An Atmospheric Teleconnection Linking ENSO and Southwestern European Precipitation'. *Journal of Climate* 24 (1): 124–39. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3590.1>.
- Smith, Doug M., Adam A. Scaife, and Ben P. Kirtman. 2012. 'What Is the Current State of Scientific Knowledge with Regard to Seasonal and Decadal Forecasting?' *Environmental Research Letters* 7 (1). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/015602>.
- Staffell, Iain, and Stefan Pfenninger. 2017. 'The Increasing Impact of Weather on Electricity Supply and Demand'. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.051>.
- Stott, Peter. 2016. 'How Climate Change Affects Extreme Weather Events'. *Science* 352 (6293): 1517–18. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.AAF7271>.
- Stott, Peter A., D. A. Stone, and M. R. Allen. 2004. 'Human Contribution to the European Heatwave of 2003'. *Nature* 432:7017 432 (7017): 610–14. <https://doi.org/10.1038/nature03089>.
- Tapiador, Francisco J., F. J. Turk, Walt Petersen, Arthur Y. Hou, Eduardo García-Ortega, Luiz A.T. Machado, Carlos F. Angelis, et al. 2012. 'Global Precipitation Measurement: Methods, Datasets and Applications'. *Atmospheric Research*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.10.021>.

- Terzago, Silvia, Giulio Bongiovanni, and Jost Von Hardenberg. 2023. 'Seasonal Forecasting of Snow Resources at Alpine Sites'. *Hydrology and Earth System Sciences* 27 (2): 519–42. <https://doi.org/10.5194/hess-27-519-2023>.
- Terzago, Silvia, Elisa Palazzi, and Jost Von Hardenberg. 2018a. 'Stochastic Downscaling of Precipitation in Complex Orography: A Simple Method to Reproduce a Realistic Fine-Scale Climatology'. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 18 (11): 2825–40. <https://doi.org/10.5194/NHESS-18-2825-2018>.
- — —. 2018b. 'Stochastic Downscaling of Precipitation in Complex Orography: A Simple Method to Reproduce a Realistic Fine-Scale Climatology'. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 18 (11): 2825–40. <https://doi.org/10.5194/NHESS-18-2825-2018>.
- Troccoli, A, M Harrison, DLT Anderson, and SJ Mason. 2008. *Seasonal Climate: Forecasting and Managing Risk*.
- Troccoli, Alberto. 2010a. 'Seasonal Climate Forecasting'. *Meteorological Applications*. John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/met.184>.
- — —. 2010b. 'Seasonal Climate Forecasting'. *Meteorological Applications* 17 (3): 251–68. <https://doi.org/10.1002/met.184>.
- Troccoli, Alberto, Karl Muller, Peter Coppin, Robert Davy, Chris Russell, and Annette L. Hirsch. 2012. 'Long-Term Wind Speed Trends over Australia'. *Journal of Climate* 25 (1): 170–83. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4198.1>.
- Tsiropoulos, I., W. Nijs, D. Tarvydas, and P. Ruiz Castello. 2020. *Towards Net-Zero Emissions in the EU Energy System by 2050*. JRC Technical Reports. <https://doi.org/10.2760/081488>.
- Tzanakakis, V. A., A. N. Angelakis, N. V. Paranychianakis, Y. G. Dialynas, and G. Tchobanoglous. 2020. 'Challenges and Opportunities for Sustainable Management of Water Resources in the Island of Crete, Greece'. *Water (Switzerland)*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/W12061538>.
- Viel, Christian, Anne-Lise Beaulant, Jean-Michel Soubeyroux, and Jean-Pierre Céron. 2016. 'How Seasonal Forecast Could Help a Decision Maker: An Example of Climate Service for Water Resource Management'. *Advances in Science and Research* 13: 51–55. <https://doi.org/10.5194/asr-13-51-2016>.
- Wang, L., M. Ting, and P. J. Kushner. 2017. 'A Robust Empirical Seasonal Prediction of Winter NAO and Surface Climate'. *Scientific Reports* 7 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00353-y>.
- Weisheimer, A., F. J. Doblas-Reyes, T. N. Palmer, A. Alessandri, A. Arribas, M. Déqué, N. Keenlyside, M. MacVean, A. Navarra, and P. Rogel. 2009. 'ENSEMBLES: A New Multi-Model Ensemble for Seasonal-to-Annual Predictions - Skill and Progress beyond DEMETER in Forecasting Tropical Pacific SSTs'. *Geophysical Research Letters* 36 (21): 1–6. <https://doi.org/10.1029/2009GL040896>.

- Weisheimer, A, and T N Palmer. n.d. 'On the Reliability of Seasonal Climate Forecasts'. <https://doi.org/10.1098/rsif.2013.1162>.
- Weisheimer, A., and T. N. Palmer. 2014a. 'On the Reliability of Seasonal Climate Forecasts'. *Journal of The Royal Society Interface* 11 (96). <https://doi.org/10.1098/RSIF.2013.1162>.
- — —. 2014b. 'On the Reliability of Seasonal Climate Forecasts'. *Journal of the Royal Society Interface* 11 (96). <https://doi.org/10.1098/rsif.2013.1162>.
- Weisheimer, Antje, Francisco J. Doblas-Reyes, Thomas Jung, and T. N. Palmer. 2011. 'On the Predictability of the Extreme Summer 2003 over Europe'. *Geophysical Research Letters* 38 (5). <https://doi.org/10.1029/2010GL046455>.
- 'What Is El Niño? | El Nino Theme Page - A Comprehensive Resource'. n.d. Accessed 27 April 2023. https://www.pmel.noaa.gov/el_nino/what-is-el-nino.

Παραρτήματα

Περίληψη των λειτουργιών και μεθόδων ανά κατηγορία, συμπεριλαμβανομένης της περιγραφής και της προέλευσης του πρώτου γνωστού κώδικα και της αναφοράς. Το πρόθεμα CST_ αναφέρεται σε συναρτήσεις που εργάζονται σε μια συγκεκριμένη κλάση αντικειμένων που ονομάζεται s2dv_cube, ενώ εκείνες χωρίς το πρόθεμα δέχονται πολυδιάστατες συστοιχίες με ονομασμένες διαστάσεις ως είσοδο.

Category	Function	Method description	Original development?	Reference
Retrieval and transformation	CST_Load	Retrieves experiment and reference data from files stored in a common format. Includes re-gridding options.	Adaptation to CSTools	Manubens et al. (2018)
	CST_Anomaly*	Calculates anomalies from experiment and reference data with or without cross-validation.	Adaptation to CSTools	Manubens et al. (2018)
	CST_SaveExp	Saves experimental data (with ensemble dimension) into NetCDF files (one for each start date).	Yes	
	CST_MergeDims	Transforms the data array with named dimension by merging two requested dimensions.	Yes	
	CST_SplitDim	Transforms the data array with named dimensions by splitting a requested dimension following a user-defined frequency or pattern.	Yes	
	as.s2dv_cube	Converts data loaded using the startR package or s2dverification Load function into a s2dv_cube object.	Yes	
	s2dv_cube	Returns a s2dv_cube object by providing the data and metadata through its arguments.	Yes	
Classification	CST_MultiEOF	Applies an EOF analysis over multiple variables retaining the minimum number of principal components needed to reach the user-defined variance.	Yes	
	CST_WeatherRegimes*	Applies a cluster analysis based on the user-defined number of clusters. A PCA could be requested to reduce the dimensionality of the dataset.	Yes	Cortesi et al. (2019), Torralba et al. (2021)
	CST_RegimesAssign*	Matches patterns with a set of reference maps (i.e., clusters from CST_WeatherRegimes) based on the minimum Euclidian distance or the highest spatial correlation.	Yes	Cortesi et al. (2019), Torralba et al. (2021)
	CST_CategoricalEnsCombination	Converts a multi-model ensemble forecast into a categorical forecast by giving the probability for each category. The following different methods are available to combine the different ensemble forecasting models into probabilistic categorical forecasts:	Yes	
		pool, for ensemble pooling where all ensemble members of all forecast systems are weighted equally,		DelSole et al. (2013)
		comb, for a model combination where each forecast system is weighted equally, and		DelSole et al. (2013)
		mmw, for model weighting.		Rajagopalan et al. (2002), Robertson et al. (2004), Van Schaeybroeck and Vannitsem (2019)
	CST_EnsClustering*	Groups ensemble members according to similar characteristics and selects the most representative member for each cluster. The user chooses which feature of the data is used to group the ensemble members, e.g., time mean, maximum, a certain percentile (e.g., 75 standard deviation), or trend over the time period.	Adaptation to CSTools	Straus et al. (2007)

Category	Function	Method description	Original development?	Reference
Downscaling	CST_Analogs*	Searches for days with similar large-scale conditions (i.e., analogs) to provide downscaled fields.	Yes	Yiou et al. (2013)
	CST_RainFarm*	Implements the Rainfall Filtered Autoregressive Model, which is a stochastic downscaling procedure based on the nonlinear transformation of a linearly correlated stochastic field.	Adaptation to CSTools	Rebora et al. (2006a, b), D'Onofrio et al. (2014), Terzago et al. (2018)
	CST_RFTemp	Downscales a temperature field by using a simple lapse rate correction.	Yes	
	CST_AdamontAnalog	Identifies analog fields in a reference dataset, based on corresponding weather types (requires CST_AdamontQQcor beforehand).	Adaptation to CSTools	Verfaillie et al. (2017)
	CST_AnalogsPredictors	Downscales precipitation and maximum and minimum temperature, using analogs and considering synoptic situations and significant predictors.	Adaptation to CSTools	Peral García et al. (2017)
Correction	CST_BEI_Weighting*	Returns a weighted ensemble mean (or weighted terciles probabilities) according to the skill of individual members at predicting a climatological index (e.g., NAO) (requires BEI_PDFBest and CST_BEI_Weighting beforehand).	Yes	Sánchez-García et al. (2019)
	CST_Calibration	Member-by-member bias correction. The following different methodologies are available:	Yes	
		bias, which corrects only the mean bias,		Torralba et al. (2017)
		evmos, which applies a variance inflation technique to ensure the correction of the bias and the correspondence of the variance between forecast and observation,		Van Schaeybroeck and Vannitsem (2011)
		mse_min, which corrects the bias, the overall forecast variance, and the ensemble spread by minimizing a constrained mean squared error,		Doblas-Reyes et al. (2005) and Torralba et al. (2017)
		crps_min, which corrects the bias, the overall forecast variance, and the ensemble spread and minimizes the continuous ranked probability score (CRPS), and		Van Schaeybroeck and Vannitsem (2015)
		rpc-based, which adjusts the forecast variance, ensuring that the ratio of predictable components (RPC) is equal to one.		Eade et al. (2014)
	CST_QuantileMapping	Quantile mapping adjustment for daily (or sub-daily) data.	Adaptation to CSTools	Gudmundsson et al. (2012), Gudmundsson (2016)
Verification	CST_DynBiasCorrection	Applies a bias correction between the model and the observations using the division into terciles of the local dimension "dim" or inverse of the persistence "theta". Model values with lower dim will be corrected with observed values with lower dim, and similarly for theta (requires Predictability and CST_ProxiesAttractor beforehand).	Yes	Faranda et al. (2017, 2019)
	CST_MultiMetric*	Computes correlation, root mean square error, and the root mean square error skill score for individual models and multi-model mean.	Adaptation to CSTools	Mamubens et al. (2018), Mishra et al. (2019)
	CST_MultivarRMSE*	Calculates the RMSE using multiple variables simultaneously.	Yes	
Category	Function	Method description	Original development?	Reference
Visualization	PlotCombinedMap*	Plots multiple lon-lat variables in a single map according to a decision function.	Yes	Mishra et al. (2019)
	PlotForecastPDF*	Plots the probability distribution function of several ensemble forecasts. Can include tercile and extreme (above P90 and below P10) categories, individual members, and a corresponding observation.	Yes	Soret et al. (2019) Lledó et al. (2020)
	PlotMostLikelyQuantileMap*	Plots the probability for the category with the maximum probability in each grid point.	Yes	Lledó et al. (2020), Torralba (2019)
	PlotPDFsOLE	Plots two probability density Gaussian functions and the optimal linear estimation (OLE) resulting from their combination.	Yes	Sánchez-García et al. (2019)
	PlotTriangles4Categories*	Function to convert any 3-D numerical array to a grid of colored triangles.	Yes	Torralba (2019), Verfaillie et al. (2021), Lledó and Doblas-Reyes (2020)