



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ & ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ-ΖΑΧΟΣ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΩΝ ΑΚΡΑΙΩΝ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΣΧΕΣΗ
CLAUSIUS-CLAPEYRON: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, ΕΛΛΑΔΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
‘ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ, ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ’

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2023





ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ-ΖΑΧΟΣ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

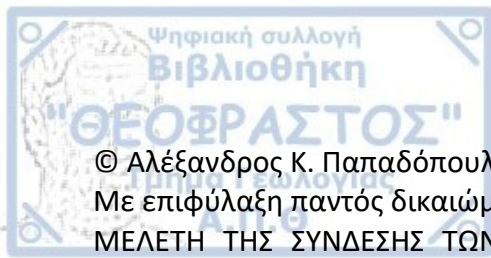
ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΩΝ ΑΚΡΑΙΩΝ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΣΧΕΣΗ CLAUDIUS-
CLAPEYRON: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, ΕΛΛΑΔΑ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών
Σπουδών 'Μετεωρολογία, Κλιματολογία και Ατμοσφαιρικό Περιβάλλον'

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 12/1/24

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Αναγνωστοπούλου Χριστίνα, Καθηγήτρια, Επιβλέπουσα
Πυθαρούλης Ιωάννης, Αναπλ. Καθηγητής
Τολικά Κωνσταντία, Αναπλ. Καθηγήτρια



© Αλέξανδρος Κ. Παπαδόπουλος-Ζάχος, Γεωλόγος, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΩΝ ΑΚΡΑΙΩΝ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΣΧΕΣΗ CLAUSIUS-CLAPEYRON: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, ΕΛΛΑΔΑ– *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*

Το έργο παρέχεται υπό τους όρους Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0.

© Alexandros K. Papadopoulos-Zachos, Geologist, 2023

All rights reserved.

THE LINK OF EXTREME PRECIPITATION WITH THE CLAUSIUS-CLAPEYRON RELATION: THE CASE STUDY OF THESSALONIKI, GREECE – *Master Thesis*

The work is provided under the terms of Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0.

Citation:

Παπαδόπουλος-Ζάχος Α. Κ., 2023. – Μελέτη της σύνδεσης των ακραίων βροχοπτώσεων με τη σχέση Clausius-Clapeyron: η περίπτωση της Θεσσαλονίκης, Ελλάδα. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 113 σελ.

Papadopoulos-Zachos A. K., 2023. – The link of extreme precipitation with the Clausius-Clapeyron relation: The case study of Thessaloniki, Greece. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 113 pp.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, 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 τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα του 21^{ου} αιώνα παγκοσμίως. Ένα από τα άμεσα αποτελέσματα της είναι η αύξηση στη συχνότητα και την ένταση των ακραίων βροχοπτώσεων που παρατηρείται σε πολλές περιοχές του πλανήτη. Το γεγονός αυτό έχει πολύ μεγάλες επιπτώσεις σε κοινωνικό και οικονομικό επίπεδο για τις πληγείσες περιοχές (πλημμυρικά φαινόμενα, απώλεια ανθρώπινων ζωών, καταστροφή υποδομών κ.α.). Οι μελλοντικές τάσεις δείχνουν περαιτέρω ενίσχυση των ακραίων βροχοπτώσεων στο δεύτερο μισό του αιώνα καθιστώντας την ανάγκη για έγκαιρη και έγκυρη πρόβλεψη των φαινομένων αυτών πιο επιτακτική από ποτέ. Ωστόσο, παρά την πολύ μεγάλη τεχνολογική ανάπτυξη των μετεωρολογικών και κλιματικών μοντέλων κατά τα τελευταία χρόνια, τα οποία είναι σε θέση να παρέχουν πλέον πολύ υψηλής ακρίβειας αποτελέσματα για τις διάφορες μετεωρολογικές παραμέτρους, αυτά παρουσιάζουν ακόμα σημαντικό πρόβλημα στο να εντοπίζουν τις ακραίες τιμές και ιδιαίτερα όσον αφορά την παράμετρο της βροχόπτωσης.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η κλιματολογική μελέτη των ακραίων βροχοπτώσεων στην περιοχή της Θεσσαλονίκης και η διερεύνηση της ευαισθησίας που εμφανίζουν αυτές σε σχέση με τη θερμοκρασία βάση της σχέσης Clausius-Clapeyron (CC). Εν συνεχεία μελετάται η ικανότητα των δεδομένων reanalysis καθώς και των κλιματικών και μετεωρολογικών μοντέλων στον εντοπισμό των ακραίων βροχοπτώσεων και επιχειρείται η χρήση των σχέσεων βροχόπτωσης-θερμοκρασίας με στόχο την βελτίωση των αποτελεσμάτων αυτών. Τα αποτελέσματα της εργασίας έχουν ιδιαίτερη σημασία για την βελτίωση της ικανότητας εκτίμησης (κλιματολογικά) και πρόγνωσης (μετεωρολογικά) των ακραίων βροχοπτώσεων καθώς και των παραμέτρων σχεδιασμού των υποδομών που είναι ευάλωτες στις πλημμύρες με στόχο την πρόληψη έναντι των ακραίων φαινομένων.



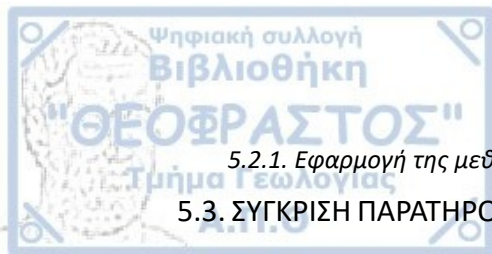
ABSTRACT

Climate change is one of the most important issues of the 21st century worldwide. One of its direct effects is the increase in the frequency and intensity of extreme precipitation events observed in many world regions. This has very significant social and economic consequences for the affected areas (flooding, loss of life, destruction of infrastructure, etc.). Future trends indicate further intensification of extreme rainfall events in the second half of the century, making the need for timely and accurate forecasting of these events more urgent than ever. However, despite the very large technological development of meteorological and climate models in recent years, which are now able to provide very high accuracy results for various meteorological parameters, they still have a significant problem in detecting extreme values, especially for the precipitation parameter.

The aim of the present thesis is the climatological study of extreme precipitation events in the region of Thessaloniki and the investigation of their sensitivity to temperature based on the Clausius-Clapeyron (CC) relationship. Subsequently, the ability of reanalysis data and climate and meteorological models in the detection of extreme precipitation is studied and the use of rainfall-temperature relations is tested in order to improve these results. The findings of this work are of particular importance in improving the ability to estimate (climatologically) and forecast (meteorologically) extreme rainfall events as well as the design parameters of flood-prone infrastructures in order to prevent against extreme events.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 1 -
1.1. ΣΧΕΣΗ CLAUSIUS-CLAPEYRON	- 5 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	- 14 -
2.1. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ.....	- 14 -
2.2. REANALYSIS- ERA5 LAND	- 15 -
2.3. ΠΕΡΙΟΧΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ICTP-REGCM4-6.....	- 15 -
2.4. ΠΕΡΙΟΧΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ WRF	- 16 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	- 17 -
3.1. ΜΕΘΟΔΟΣ QUANTILE REGRESSION	- 17 -
3.2. ΜΕΘΟΔΟΣ BINNING	- 20 -
3.3. ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	- 20 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	- 22 -
4.1. ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΚΡΑΙΩΝ ΕΠΕΙΣΟΔΙΩΝ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ	- 22 -
4.2. ΣΧΕΣΗ ΑΚΡΑΙΩΝ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ-ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ	- 29 -
4.2.1. ΩΡΙΑΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ	- 29 -
4.2.1.1. Μέθοδος Quantile regression	- 29 -
4.2.1.2. Μέθοδος Binning	- 34 -
4.2.2. ΤΡΙΩΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ	- 36 -
4.2.2.1. Μέθοδος Quantile regression	- 36 -
4.2.2.2. Μέθοδος Binning	- 38 -
4.2.3. ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ	- 39 -
4.2.4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ	- 41 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΣΕ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ.....	- 45 -
5.1. ΔΕΔΟΜΕΝΑ REANALYSIS ERA5-LAND.....	- 45 -
5.1.1. Εφαρμογή της μεθόδου binning στα δεδομένα Reanalysis.....	- 47 -
5.2. ΠΕΡΙΟΧΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ICTP-REGCM4-6.....	- 48 -



5.2.1. Εφαρμογή της μεθόδου binning στα δεδομένα	- 49 -
5.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΟΥΜΕΝΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ	- 51 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ ΣΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	
REANALYSIS ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	- 55 -
6.1. ΔΕΔΟΜΕΝΑ REANALYSIS	- 55 -
6.1.1. Ωριαία δεδομένα	- 55 -
6.1.2. Τρίωρα δεδομένα	- 59 -
6.1.3. Ημερήσια δεδομένα	- 63 -
6.2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΕΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	- 65 -
6.2.1. Ιστορική περίοδος 1971-2000	- 65 -
6.2.2. Μελλοντική περίοδος 2071-2100	- 69 -
6.2.3. Σύγκριση ιστορικής-μελλοντικής περιόδου	- 72 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΣΕ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ	- 76 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	- 80 -
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	- 85 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο καιρός και το κλίμα αποτελούν τον βασικό ρυθμιστικό παράγοντα για την διαβίωση όλων των ζωντανών οργανισμών. Οι κλιματικές συνθήκες κάθε περιοχής του πλανήτη καθορίζουν την χλωρίδα και πανίδα που επικρατούν καθώς και όλες τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Το κλίμα ωστόσο, παρότι αναφέρεται στις μέσες καιρικές συνθήκες που επικρατούν σε μια περιοχή για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, δεν παραμένει σταθερό αλλά μεταβάλλεται διαρκώς στο χρόνο. Η αλλαγή αυτή που παρουσιάζει το παγκόσμιο κλίμα μπορεί να οφείλεται σε φυσικές διεργασίες, πλανητικές και εξωγήινες, και σε αυτήν την περίπτωση καλείται φυσική κλιματική μεταβλητότητα. Από γεωλογικά ευρήματα, παλαιοκλιματολογικά στοιχεία, νεότερες ιστορικές αναφορές καθώς και μετεωρολογικές παρατηρήσεις έχουν κατασκευαστεί χρονοσειρές που δείχνουν ότι πράγματι το παγκόσμιο κλίμα μεταβάλλονταν και μεταβάλλεται διαρκώς. Ωστόσο εδώ και δεκαετίες έχει επιβεβαιωθεί και η επίδραση των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στο κλιματικό σύστημα. Κύρια αιτία αποτελεί η εκπομπή θερμοκηπικών αερίων στην ατμόσφαιρα από την βιομηχανία και την κτηνοτροφία που εντείνουν το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου και οδηγούν σε αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη. Παρότι στην ιστορία της Γης έχουν παρατηρηθεί θερμοκρασίες υψηλότερες από ό,τι σήμερα, ο ρυθμός αύξησης λόγω των ανθρωπογενών εκπομπών είναι πρωτόγνωρος. Η μέση παγκόσμια θερμοκρασία έχει αυξηθεί κατά $1,1^{\circ}\text{C}$ σε σχέση με τα προ-βιομηχανικά επίπεδα (IPCC, 2023), ενώ το 2023 αναμένεται να είναι το θερμότερο έτος από αρχής καταγραφών με την θερμοκρασιακή απόκλιση να είναι στους $+1,4^{\circ}\text{C}$ για την περίοδο Ιανουαρίου-Σεπτεμβρίου σύμφωνα με την έκθεση του Copernicus τον Σεπτέμβριο του 2023. Όπως είναι αναμενόμενο, αυτή η απότομη αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αξιοσημείωτη διατάραξη στο κλιματικό σύστημα, το οποίο χρειάζεται μεγάλο χρονικό διάστημα για να επέλθει σε ισορροπία, με αποτέλεσμα σημαντικές επιπτώσεις σε όλες τις κλιματικές παραμέτρους.

Μια από τις σημαντικότερες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής αφορά τις διαταραχές του υδρολογικού κύκλου. Οι διαταραχές αυτές δεν αναμένεται να είναι ομοιόμορφες όπως συμβαίνει με την αύξηση της θερμοκρασίας. Σε ορισμένες περιοχές υπάρχει τάση

για αύξηση της μέσης βροχόπτωσης ενώ σε άλλες αναμένεται μείωση. Συγκεκριμένα, παρατηρούνται μειώσεις στις υποτροπικές περιοχές και αυξήσεις στα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη και ιδιαίτερα σε Β. Αμερική, Ευρασία και Αργεντινή. Οι αρνητικές τάσεις παρατηρούνται ιδιαίτερα στη Μεσόγειο, νότια Ασία και Αφρική (IPCC, 2023; Trenberth, 2011). Παγκοσμίως σύμφωνα με τις προβολές των μοντέλων αναμένεται μείωση στη συχνότητα υγρών ημερών και αύξηση των ξηρών, αύξηση στη μέση ένταση των επεισοδίων βροχής, αύξηση στην ένταση και συχνότητα των ακραίων βροχοπτώσεων με παράλληλη μείωση στη συχνότητα των επεισοδίων χαμηλής και μέσης έντασης. Επιπλέον, αναμένεται μείωση στη μέση διάρκεια των υγρών επεισοδίων και στη μέση έκταση που καταλαμβάνουν, ενώ στο μέλλον αναμένεται η εμφάνιση επεισοδίων βροχής με μέγεθος που υπερβαίνει τα επεισόδια που εμφανίζονται κάτω από τις παρούσες κλιματικές συνθήκες (Giorgi et al., 2019). Οι μεταβολές στα ακραία δεν συμβαδίζουν απαραίτητα με τις μεταβολές της μέσης βροχόπτωσης. Οι ακραίες βροχοπτώσεις παρουσιάζουν γενικώς αυξητικές τάσεις παγκοσμίως ακόμα και στις περιοχές που παρατηρείται μείωση στη μέση βροχόπτωση (Trenberth, 2011). Ιδιαίτερα, στις ξηρότερες περιοχές η αύξηση των ακραίων φαίνεται να είναι σημαντικά μεγαλύτερη γεγονός που προκύπτει τόσο από τις παρατηρήσεις όσο και από τις προσομοιώσεις μοντέλων (Donat et al., 2016).

Οι ακραίες βροχοπτώσεις έχουν πολύ σημαντικές επιπτώσεις για τον πληθυσμό που πλήττεται, ιδιαίτερα στα μεγάλα αστικά κέντρα, καθώς συνοδεύονται από πλημμυρικά φαινόμενα και καταστροφές υποδομών. Ωστόσο, οι αλλαγές στις χρήσεις γης μεταβάλλουν τον πλημμυρικό κίνδυνο και τα αντιπλημμυρικά έργα που έχουν αναπτυχθεί κυρίως τα τελευταία χρόνια παίζουν σημαντικό ρόλο στη μείωση εμφάνισης πλημμυρών. Συνεπώς, δεν είναι εύκολη η σύνδεση τους με τα ακραία επεισόδια βροχόπτωσης και απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή (Trenberth, 2011).

Όσον αφορά την περιοχή της Μεσογείου, σύμφωνα με το IPCC, δεν παρατηρούνται στατιστικά σημαντικές τάσεις στην ετήσια βροχόπτωση καθ' όλη την έκταση της. Η ετήσια βροχόπτωση αναμένεται να παρουσιάσει μείωση της τάξης του 4% για κάθε 1°C αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας, η μείωση αναμένεται κυρίως στη θερινή περίοδο για τις βόρειες περιοχές της λεκάνης της Μεσογείου και για όλες τις εποχές στις κεντρικές και

νότιες περιοχές (E. Ali & Cramer, 2023). Αυτή η μείωση στην μέση βροχόπτωση εκτιμάται ότι οφείλεται στην βόρεια επέκταση του δακτυλίου του Hadley, η οποία οδηγεί σε ξηρότερες συνθήκες πάνω από τη Μεσόγειο (Giorgi et al., 2019). Στην Ελλάδα, η τάση της ετήσιας βροχόπτωσης είναι πτωτική κατά τη διάρκεια του 20^{ου} και τις αρχές του 21^{ου} αιώνα (Feidas et al., 2007; Nastos & Zerefos, 2010; Philandras et al., 2011), ενώ κατά την τελευταία τεσσαρακονταετία διακρίνεται μια αυξητική τάση (Cherif et al., 2020). Στην περίπτωση της Θεσσαλονίκης, δεν εμφανίζεται κάποια στατιστικά σημαντική τάση στη χρονοσειρά της ετήσιας βροχόπτωσης του σταθμού (Pakalidou & Karacosta, 2018).

Με βάση την έκθεση του IPCC, οι ακραίες βροχοπτώσεις έχουν αυξηθεί (medium confidence) σε πολλές βόρειες περιοχές της Μεσογείου και αναμένεται να αυξηθούν κι άλλο στο βορρά (high confidence) και πιθανά θα συνοδεύονται από αύξηση των πλημμυρών, ενώ στο νότο δεν αναμένεται αλλαγή (E. Ali & Cramer, 2023). Αυτό το δίπολο, η διαφορετική συμπεριφορά μεταξύ των βόρειων και νότιων περιοχών, έχει παρατηρηθεί σε πολλές έρευνες. Οι Tramblay και Somot (2018) πραγματοποίησαν μελέτη των ιστορικών και μελλοντικών τάσεων της ακραίας βροχόπτωσης στις περιοχές της Μεσογείου με την χρήση περιοχικών μοντέλων με 12 km οριζόντια ανάλυση. Τα αποτελέσματα έδειξαν αύξηση της ακραίας βροχόπτωσης στις βόρειες λεκάνες της Μεσογείου με μεγάλη συμφωνία των μοντέλων και παράλληλα ελάττωση των ακραίων στις νότιες-νοτιοανατολικές λεκάνες, αλλά με μεγαλύτερη αβεβαιότητα. Η περίοδος έναρξης των τάσεων αυτών εντοπίζεται πριν το 2000 στις περισσότερες περιπτώσεις γεγονός που είναι σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις στις περιοχές αυτές. Παρόμοια γεωγραφική κατανομή εμφανίζεται και με τα δύο κλιματικά σενάρια (RCP4.5 και RCP8.5) και σε όλες τις προσομοιώσεις των περιοχικών μοντέλων. Το σήμα αυτό είναι ισχυρότερο υπό το σενάριο RCP8.5 στο οποίο υπάρχει μεγαλύτερη συμφωνία μεταξύ των μοντέλων (Tramblay & Somot, 2018). Οι διαφορές αυτές μεταξύ των ισχυρότερων επεισοδίων βροχής σε Βόρεια και Νότια Μεσόγειο αναμένεται να ενταθούν ακόμα περισσότερο στο μέλλον (Lionello & Scarascia, 2020).

Υπό το σενάριο RCP8.5 οι περισσότερες προσομοιώσεις δείχνουν σημαντική αύξηση των ακραίων, η οποία μπορεί να ξεπεράσει το 20% τοπικά σε λεκάνες της Ιταλίας, Γαλλίας, Σλοβενίας, Κροατίας και Αδριατικής καθώς και στη Βόρεια Ελλάδα (Tramblay &

Somot, 2018). Όσον αφορά τα ακραία φαινόμενα, στην Θεσσαλονίκη η μελέτη των αποκλίσεων από τον μέσο όρο ανά δεκαετία δείχνει ότι οι αρνητικές αποκλίσεις είναι συχνότερες από τις θετικές, ωστόσο ξεκινώντας από το 1961 οι θετικές αποκλίσεις αυξάνονται και η μεγαλύτερη θετική απόκλιση παρατηρήθηκε την περίοδο 2011-2015 (Pakalidou & Karacosta, 2018). Τα ημερήσια ακραία, παρουσιάζουν μια έξαρση κατά την περίοδο 1981-1988, στη συνέχεια ακολουθεί μια περίοδος κατά την οποία εμφανίζουν σημαντική μείωση (1988-1994), ενώ από το 1995 και μετά παρατηρείται εκ νέου αύξηση (Papadopoulos-Zachos, 2020). Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του 2014 κατά το οποίο καταγράφηκαν συνολικά 912,2 mm βροχής σε 133 ημέρες στον σταθμό του ΑΠΘ, καθιστώντας το, το πιο υγρό έτος από αρχής καταγραφών (Tolika et al., 2018). Όσον αφορά τις μελλοντικές τάσεις για την πόλη της Θεσσαλονίκης, υπό από το σενάριο RCP8.5, η μέγιστη τιμή του δείκτη RX1DAY (μέγιστη ημερήσια βροχόπτωση/έτος) φαίνεται να αυξάνεται από 93 mm για την περίοδο 1951-2000 σε 109 mm (2001-2050) και σε 132 mm (2051-2100), παράλληλα αναμένεται μείωση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης από 436 mm σε 428 mm και σε 407 mm αντίστοιχα για τις προαναφερθείσες περιόδους (Zittis et al., 2021). Έτσι, η συμβολή της πιο ακραίας ημέρας βροχής στο συνολικό ετήσιο υετό αναμένεται να αυξηθεί.

Στη Μεσόγειο, η ένταση και οι επιπτώσεις των πλημμυρών διαφέρουν σημαντικά μεταξύ δυτικών και ανατολικών περιοχών, με το δυτικό τμήμα να είναι πολύ πιο εκτεθειμένο γεγονός που συνδέεται με την επίδραση του Ατλαντικού και των συστημάτων που καταφθάνουν από αυτόν. Η πλειοψηφία των ισχυρών πλημμυρικών επεισοδίων εντοπίζεται το φθινόπωρο, ενώ δεν παρατηρείται κάποια στατιστικά σημαντική τάση στη συχνότητα και των μέγεθος τους ούτε στις παρατηρήσεις αλλά ούτε στις μελλοντικές προσομοιώσεις (Gaume et al., 2018). Στην Ανατολική Μεσόγειο μελέτη των έντονων πλημμυρών, οι οποίες συνδέονται με θανάτους, δείχνει ότι υπάρχει αύξηση τις τελευταίες δεκαετίες. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι τα πλημμυρικά επεισόδια με τουλάχιστον δέκα θανάτους εμφανίζουν περίοδο επαναφοράς μόλις 1,56 έτη (Diakakis et al., 2023). Στην Ελληνική περιοχή αντίστοιχα, οι πλημμύρες κατατάσσονται στην πρώτη θέση των έντονων καιρικών φαινομένων όσο αναφορά τις επιπτώσεις, με την μεγαλύτερη

συχνότητα εμφάνισης να εντοπίζεται το φθινόπωρο και ιδιαίτερα τον Οκτώβριο και Νοέμβριο (Diakakis & Deligiannakis, 2017; Paragiannaki et al., 2013; Pereira et al., 2017).

Όσον αφορά την χωρική κατανομή, η Θεσσαλονίκη μαζί με την Χαλκιδική, την Αττική και την Ηλεία αποτελούν τις περιοχές που επηρεάζονται περισσότερο. Συγκεκριμένα στη Θεσσαλονίκη, 71% των συνολικών έντονων φαινομένων αφορούν πλημμύρες ύστερα από έντονες βροχοπτώσεις (Paragiannaki et al., 2013). Έχει παρατηρηθεί αυξητική τάση στα επεισόδια τα τελευταία χρόνια και συγκεκριμένα από το 1986 και έπειτα, ωστόσο οι θάνατοι δεν εμφανίζουν αντίστοιχη τάση (Diakakis et al., 2012). Η αύξηση μπορεί παρόλα αυτά να αποδοθεί και σε μη μετεωρολογικούς παράγοντες. Ιδιαίτερα σε μεγάλες πόλεις, όπως η Θεσσαλονίκη, εξαιτίας του μεγάλου πληθυσμού τους, η έκθεση σε τέτοιες καταστροφές είναι μεγαλύτερη. Επιπλέον, η σημαντική αύξηση των οικονομικών επιπτώσεων από τις πλημμύρες συνδέεται και αυτή με την αύξηση του πληθυσμού και την έντονη αστικοποίηση (Paragiannaki et al., 2013). Αξίζει να σημειωθεί, ότι παρότι υπάρχουν στοιχεία για αύξηση των ακραίων, αλλά και της επιφανειακής απορροής μετά από τέτοια φαινόμενα, ελάχιστες χώρες έχουν αναπτύξει συστήματα αντιμετώπισης (Madsen et al., 2014).

1.1. ΣΧΕΣΗ CLAUSIUS-CLAPEYRON

Μια από τις βασικότερες εξισώσεις στη θερμοδυναμική είναι η σχέση Clausius-Clapeyron (CC). Η διαφορική αυτή εξίσωση συνδέει την πίεση μιας ουσίας με την θερμοκρασία σε ένα σύστημα στο οποίο δύο φάσεις της ουσίας αυτής βρίσκονται σε ισορροπία. Στην μετεωρολογία και κλιματολογία η πιο γνωστή μορφή της εξίσωσης είναι η εξής:

$$\frac{de_s}{e_s} = \frac{L_u}{R_u} \frac{dT}{T^2}$$

Όπου:

- e_s η μέγιστη τάση των υδρατμών
- T η θερμοκρασία του αέρα σε βαθμούς Kelvin (K)
- L_u η λανθάνουσα θερμότητα εξαέρωσης του νερού

- R_u η ειδική σταθερά των υδρατμών

Από την ολοκλήρωση της παραπάνω σχέσης και επειδή $L_u=600 \text{ cal/gr}$, $R_u=462 \text{ J/Kgr grad}$ και $e_{s0}=6,11 \text{ hPa}$ (η μέγιστη τάση των υδρατμών στους 273 K ή 0°C) προκύπτει η πιο απλοποιημένη μορφή :

$$e_s(T) = 0.611 \exp\left(\frac{17.67 T}{T + 243.5}\right)$$

Η παραπάνω σχέση έχει μια ακρίβεια της τάξης του 0.3% για θερμοκρασίες $-35^\circ\text{C} < T < 35^\circ\text{C}$ και δείχνει ότι η μέγιστη τάση των κορεσμένων υδρατμών είναι μονοσήμαντη συνάρτηση της θερμοκρασίας (Bolton, 1980). Συγκεκριμένα, προκύπτει ότι η τάση των υδρατμών, συνεπώς και η χωρητικότητα της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς, αυξάνεται εκθετικά με τη θερμοκρασία. Η αύξηση αυτή στη χωρητικότητα εκτιμάται ότι είναι της τάξης του 7% για κάθε 1°C αύξηση της θερμοκρασίας.

Οι Allen και Ingram (2002) ανέφεραν πρώτοι τη θεωρία ότι εφόσον η σχετική υγρασία στην ατμόσφαιρα παραμένει σταθερή (βάσει προσομοιώσεων μοντέλων και παρατηρήσεων), τότε η ειδική υγρασία, σύμφωνα με την εξίσωση Clausius-Clapeyron, αναμένεται να αυξηθεί με αύξηση της θερμοκρασίας και μάλιστα εκθετικά. Ακολουθώντας, έθεσαν την ιδέα ότι αν η συγκέντρωση υγρασίας στην τροπόσφαιρα ελέγχεται από τους περιορισμούς της (περίπου) αμετάβλητης σχετικής υγρασίας και της σχέσης Clausius-Clapeyron, θα πρέπει να αναμένεται μια αντίστοιχη εκθετική αύξηση των παγκόσμιων βροχοπτώσεων και της συνολικής έντασης του υδρολογικού κύκλου με την αύξηση των παγκόσμιων θερμοκρασιών (Allen & Ingram, 2002). Η θεωρία αυτή, δεν επιβεβαιώνεται από τις προσομοιώσεις των μοντέλων, σύμφωνα με τα οποία η αύξηση εμφανίζεται αρκετά μικρότερη από το $7\%/^\circ\text{C}$ που προκύπτει από την εξίσωση, ωστόσο έθεσε τις βάσεις για έρευνα γύρω από το συγκεκριμένο θέμα. Ο λόγος που δεν προκύπτει αύξηση αντίστοιχη με αυτήν που ορίζει η Clausius-Clapeyron είναι γιατί οι αλλαγές στη συνολική ένταση του υδρολογικού κύκλου ελέγχονται όχι από τη διαθεσιμότητα της υγρασίας, αλλά από τη διαθεσιμότητα της ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, από την ικανότητα της τροπόσφαιρας να ακτινοβολεί τη λανθάνουσα θερμότητα που απελευθερώνεται από τις βροχοπτώσεις

(Allen & Ingram, 2002). Οι Pall, Allen και Stone (2007) κατέληξαν αργότερα ότι αν και στην περίπτωση της μέσης βροχόπτωσης οι αλλαγές καθορίζονται από το ενεργειακό ισοζύγιο, η μεταβολή στα ανώτερα ποσοστημόρια της κατανομής της βροχόπτωσης αναμένεται να περιορίζεται από την διαθεσιμότητα υγρασίας, δηλαδή από τη σχέση Clausius-Clapeyron (Pall et al., 2007). Θεωρητικά επομένως, εάν τα πιο ισχυρά επεισόδια βροχόπτωσης είναι πιθανό να συμβούν όταν ουσιαστικά όλη η υγρασία που υπάρχει σε έναν όγκο αέρα κατακρημνίζεται, και η ένταση αυτών των επεισοδίων αυξάνεται με τη διαθεσιμότητα της υγρασίας, θα αναμενόταν τα ανώτερα ποσοστημόρια της κατανομής της βροχόπτωσης να αυξάνονται επίσης ανάλογα με την Clausius-Clapeyron. Αναφέρεται ότι αυτό θα είχε εφαρμογή εάν οι αλλαγές στις περιβαλλοντικές ροές έχουν μικρή επίδραση στη σύγκλιση της υγρασίας, το οποίο είναι πιθανότερο στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη.

Προκειμένου να υπάρχει αύξηση των ακραίων με ρυθμό που ορίζει η σχέση Clausius-Clapeyron (CC) θα πρέπει να υπάρχει διαθεσιμότητα υγρασίας στην ατμόσφαιρα και στις περιοχές που δεν υπάρχει π.χ. σε ηπειρωτικές περιοχές, η σχέση ακραίων βροχοπτώσεων-θερμοκρασίας θα είναι μικρότερη από αυτήν που ορίζει η σχέση (sub-Clausius-Clapeyron ή sub-CC) (Drobinski et al., 2018). Στις τροπικές περιοχές, οι ροές που οδηγούν σε κατακρημνίσεις καθορίζονται οι ίδιες σε μεγάλο βαθμό από τη λανθάνουσα θερμότητα που απελευθερώνεται από τη βροχόπτωση, και συνεπώς αναμένονται αυξήσεις που υπερβαίνουν τον αναμενόμενο ρυθμό από την Clausius-Clapeyron (super Clausius-Clapeyron ή super CC)(Pall et al., 2007). Το ίδιο συμβαίνει και σε περιοχές μεγαλύτερων γεωγραφικών πλατών αν υπάρχουν ροές υγρασίας από κάποια γειτονική περιοχή κατά την διάρκεια του ακραίου φαινομένου (Drobinski et al., 2018).

Η σύγκριση της μεταβολής των ακραίων βροχοπτώσεων σε σχέση με την πρόβλεψη βάσει της Clausius-Clapeyron και σε σχέση με τη μεταβολή στη μέση βροχόπτωση δείχνει ότι οι μεταβολές των ακραίων ταιριάζουν καλύτερα με την πρόβλεψη της CC παρά με την μεταβολή στη μέση βροχόπτωση για όλα τα πλάτη μεταξύ -60° και $+60^{\circ}$ (Pall et al., 2007). Επιπλέον, η χρήση της θερμοδυναμικής σχέσης Clausius-Clapeyron παρέχει καλή πρόβλεψη των μελλοντικών αλλαγών στις ακραίες βροχοπτώσεις κυρίως στα μέσα γεωγραφικά πλάτη. Η σχέση αυτή μεταξύ των ανώτερων ποσοστημορίων της βροχόπτωσης και

της θερμοκρασίας στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται με τον όρο Clausius-Clapeyron scaling ή εν συντομία CC scaling. Η εφαρμοστικότητα του CC scaling στη σχέση θερμοκρασίας – ακραίων βροχοπτώσεων ενέχει ακόμα αβεβαιότητες. Επικρατούν δύο αντιλήψεις, από την μία η μακροχρόνια αντίληψη που διατυπώθηκε από τους Allen & Ingram, (2002) ότι οι μεταβολές στις ακραίες τιμές βροχόπτωσης σε ένα θερμότερο κλίμα ακολουθούν σε κλίμακα την σχέση CC και αναφέρεται σαν «προβλεπόμενο» scaling (projected). Από την άλλη υπάρχουν πολλές έρευνες που συνδέουν τις ακραίες βροχοπτώσεις με την μέση ημερήσια θερμοκρασία στις σημερινές παρατηρήσεις. Αυτή η σχέση αναφέρεται ως «παρατηρούμενο» scaling (observed). Αυτά τα δύο συνδέονται και οι αποκλίσεις από τη θερμοδυναμική CC συμπεριφορά έχουν παρόμοια προέλευση (Drobinski et al., 2018).

Στην περίπτωση του παρατηρούμενου scaling, στην εργασία των Utsumi et al (2011) εξετάζεται για πρώτη φορά η σχέση των ακραίων ημερήσιων βροχοπτώσεων με την μέση ημερήσια θερμοκρασία από παρατηρήσεις σταθμών. Προκύπτει ότι η ημερήσια ένταση εμφανίζει διαφορετικό είδους scaling με τη μέση θερμοκρασία ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή. Συγκεκριμένα στις τροπικές περιοχές (20° B-20° N) επικρατεί μονοτονικά αρνητικό scaling, αντίθετα μονοτονικά θετικό scaling εντοπίζεται σε περιοχές με μεγάλο γεωγραφικό πλάτος στο Β. Ημισφαίριο (>55° B). Στα μέσα γεωγραφικά πλάτη (20°-55° B και N) κυριαρχεί θετικό scaling μέχρι ένα θερμοκρασιακό όριο και στη συνέχεια αρνητικό. Αυτή η συμπεριφορά, έχει παρατηρηθεί σε πολλές περιοχές και συνδέεται με τον περιορισμό της διαθεσιμότητας υγρασίας στις υψηλότερες θερμοκρασίες (Tang et al., 2023).

Η πιο διαδεδομένη θερμοκρασιακή παράμετρος για την εύρεση της σχέσης των ακραίων βροχοπτώσεων με τη θερμοκρασία είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία και όχι η θερμοκρασία κατά την διάρκεια του φαινομένου (Martinkova & Kysely, 2020). Ο λόγος που δεν προτιμώνται οι ωριαίες θερμοκρασίες είναι εξαιτίας της μεγάλης επίδρασης που δέχονται από τις διεργασίες του οριακού στρώματος και την ακτινοβολία. Αντίθετα, η μέση ημερήσια θερμοκρασία αντιπροσωπεύει καλύτερα την αέρια μάζα πάνω από την περιοχή (Lenderink & Van Meijgaard, 2008). Επιπρόσθετα, η θερμοκρασία κατά την ώρα του φαινομένου επηρεάζεται από την ψύξη που προκαλείται από την ίδια την βροχόπτωση (Manola et al., 2018). Η χρήση της μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας βασίζεται

στην παραδοχή ότι η σχετική υγρασία παραμένει σταθερή στην κλιματική αλλαγή. Έχει παρατηρηθεί από διάφορες εργασίες ότι η χρήση του σημείου δρόσου αντί της θερμοκρασίας αναπαριστά καλύτερα την σχέση βροχόπτωσης-θερμοκρασίας. Η χρήση του σημείου δρόσου αντί της επιφανειακής θερμοκρασίας αποτελεί καλύτερο και πιο ρεαλιστικό δείκτη της απόκρισης των ακραίων βροχοπτώσεων στην αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό συμβαίνει διότι συνυπολογίζεται η σχετική υγρασία στο σημείο δρόσου, η οποία για να ισχύει η σχέση CC πρέπει να παραμένει σταθερή. Κάτι τέτοιο ωστόσο, δεν ισχύει για όλες τις περιοχές και ιδιαίτερα για τις υψηλές θερμοκρασίες, όπου παρατηρείται περιορισμός της σχετικής υγρασίας (Zhang et al., 2019). Έρευνα στις αστικές περιοχές της Ινδίας έδειξε ότι με την χρήση της επιφανειακής θερμοκρασίας οι ακραίες βροχοπτώσεις ($>95^\circ$ ποσοστημόριο) εμφανίζουν αρνητικό scaling για την πλειοψηφία των σταθμών σε αντιδιαστολή με το σημείο δρόσου όπου το scaling είναι θετικό και μάλιστα υπερβαίνει τον ρυθμό CC. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι όταν δοκιμάστηκε η χρήση της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας μία με τρεις ημέρες πριν από κάθε επεισόδιο προέκυψε θετικό scaling (H. Ali & Mishra, 2017).

Ιδιαίτερο ρόλο, ωστόσο, διαδραματίζει η χρονική κλίμακα που μελετάται η σχέση, διότι παρατηρείται σημαντικά μεγαλύτερη αύξηση της ακραίας βροχόπτωσης με τη θερμοκρασία, που υπερβαίνει τον ρυθμό που ορίζει η Clausius-Clapeyron (super-CC) σε ωριαίες κλίμακες. Σε ακόμα μικρότερη χρονική κλίμακα (δεκάλεπτες και πεντάλεπτες εντάσεις) η αύξηση μπορεί να ανέρχεται σε έως και δύο φορές την Clausius-Clapeyron (2CC). Στην Αυστρία, οι μέγιστες εντάσεις δεκαλέπτου εμφανίζουν αύξηση με τη θερμοκρασία σε ρυθμό που υπερβαίνει την CC (super-CC) και οι μέγιστες ωριαίες εντάσεις παρουσιάζουν μικρότερη αύξηση με τη θερμοκρασία (ρυθμός της τάξης του CC). Ο αθροιστικός ημερήσιος υετός μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας (αρνητική τάση) για τους περισσότερους σταθμούς (Schroeer & Kirchengast, 2018). Στην Ολλανδία, η ανάλυση της μέγιστης ωριαίας έντασης βροχόπτωσης για το σύνολο των σταθμών σε σχέση με τη θερμοκρασία δείχνει super-CC scaling κοντά στα 2CC (Lenderink et al., 2017). Το πιο έντονο scaling, που εμφανίζεται στις ωριαίες και δεκάλεπτες εντάσεις, δείχνει ότι σε αυτές τις μικρές χρονικές κλίμακες οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα είναι πιο απλές. Οι

ημερήσιες τιμές εμφανίζουν πιο πολύπλοκη συμπεριφορά, γεγονός που φανερώνει πιο σύνθετη αλληλεπίδραση των διεργασιών σε ημερήσιο επίπεδο, επιδρώντας στο βαθμό του scaling (Lenderink & Van Meijgaard, 2008).

Σε μεγάλο αριθμό μελετών, υπολογίζεται η σχέση διαχωρίζοντας πρώτα τις ακραίες βροχοπτώσεις ανάλογα με την προέλευση του υετού σε επεισόδια αστάθειας (convective) και μη αστάθειας ή στρωματόμορφα (non-convective or stratiform). Στην Γερμανία, και οι δύο τύποι υετού εμφανίζουν αύξηση με τη θερμοκρασία. Τα πιο ακραία επεισόδια υετού αστάθειας (convective) υπερβαίνουν τον ρυθμό της CC, ενώ για τον υετό από στρωματόμορφα νέφη (stratiform) ο ρυθμός αύξησης είναι μικρότερος (Berg et al., 2013). Στην Ελβετία, ο ρυθμός αύξησης της βροχόπτωσης με τη θερμοκρασία για τα επεισόδια αστάθειας βρέθηκε σταθερά μεγαλύτερος από ότι στα στρωματόμορφα, ωστόσο όταν και οι δύο τύποι μελετηθούν συνδυαστικά χωρίς να διαχωριστούν, ο ρυθμός του CC-scaling είναι μεγαλύτερος (Molnar et al., 2015).

Στη Μεσόγειο, οι ακραίες βροχοπτώσεις (99^ο ποσοστημόριο) σε ημερήσια ή μικρότερη κλίμακα (τρίωρες, ωριαίες και δεκάλεπτες εντάσεις) από τα δεδομένα του E-OBS, ακολουθώντας την συμπεριφορά που εντοπίστηκε για τα μέσα γεωγραφικά πλάτη από τους Utsumi et al.(2011), εμφανίζουν αύξηση με ρυθμό κοντά στον CC (7%/°C) μέχρι ένα θερμοκρασιακό όριο και στη συνέχεια ακολουθούν sub-CC ή αρνητικό. Παρουσιάζουν κατ' αυτόν τον τρόπο ένα χαρακτηριστικό σχήμα σαν «γάντζο» (hook shape). Το θερμοκρασιακό όριο δείχνει την θερμοκρασία στην οποία εμφανίζεται απότομη αλλαγή στην σχέση βροχόπτωσης-θερμοκρασίας (Drobinski et al., 2018). Στη δυτική μεσόγειο (Ισπανία, Γαλλία), το όριο αυτό είναι στους 20°C, ενώ σε περιοχές της ανατολικής Μεσογείου το όριο αυτό μειώνεται και στην Ελλάδα εντοπίζεται στους 7°C. Ανατολικότερα, στο Ισραήλ δεν εντοπίζεται σημείο καμπής, καθώς η καμπύλη δείχνει συνεχώς αρνητική σχέση βροχόπτωσης-θερμοκρασίας. Στην Κρήτη, με την χρήση του σημείου δρόσου, αντί της θερμοκρασίας, τα αποτελέσματα έδειξαν διαφορετική συμπεριφορά για κάθε εποχή εξαιτίας της διαφορετικής φύσης του υετού (convective, stratiform, ορογραφικός). Τους θερινούς μήνες η αύξηση φτάνει και υπερβαίνει τον ρυθμό του 21%/°C, ο οποίος ισούται

με 3 φορές τον ρυθμό που ορίζει η Clausius-Clapeyron, ενώ τις υπόλοιπες εποχές το scaling είναι κοντά στο CC ή και μικρότερο (Grillakis & Koutroulis, 2018).

Παράλληλα, αξίζει να σημειωθεί ότι το είδος των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της σχέσης ακραίων βροχοπτώσεων-θερμοκρασίας για μια περιοχή πρέπει να επιλέγεται με προσοχή. Σε περιπτώσεις που το δίκτυο των διαθέσιμων μετεωρολογικών σταθμών δεν καλύπτει την περιοχή μελέτης, πολλές εργασίες χρησιμοποιούν δεδομένα από άλλες πηγές (reanalysis, E-OBS, προσομοιώσεις μοντέλων). Για τα δεδομένα αυτά, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν ότι μπορεί να έχουν αδυναμίες στην προσομοίωση των υπό μελέτη φαινομένων, ιδιαίτερα των ακραίων βροχοπτώσεων. Στην εργασία των Drobinski et al.(2018) αναφέρεται ότι τα E-OBS συγκριτικά με τους σταθμούς τείνουν να υποεκτιμούν συστηματικά τις ακραίες τιμές (dry bias). Το ίδιο συμβαίνει και με τα ERA5 και ERA5-Land, τα οποία έχουν την τάση να υπερεκτιμούν τα μικρά επεισόδια, ενώ υποεκτιμούν τα ισχυρότερα (Gomis-Cebolla et al., 2023; Lavers et al., 2022). Ταυτόχρονα, τα κλιματικά μοντέλα γενικά υποεκτιμούν την συσχέτιση με τη θερμοκρασία -με εξαίρεση τα πολύ ισχυρά επεισόδια- και οι αυξήσεις στην ακραία βροχόπτωση, καθώς το κλίμα αλλάζει, μπορεί εν τέλει να ακολουθούν μια εξάρτηση από τη θερμοκρασία που να υπερβαίνει κατά πολύ την σχέση CC (Lenderink & Van Meijgaard, 2008).

Αναφορικά με την σχέση των ακραίων βροχοπτώσεων με τη θερμοκρασία στο μελλοντικό κλίμα υπό την επίδραση της κλιματικής αλλαγής, επικρατεί η άποψη ότι η σχέση Clausius-Clapeyron μπορεί να ελέγχει και τις μελλοντικές αλλαγές στις ακραίες βροχοπτώσεις. Η άποψη αυτή βασίζεται σε τρία βασικά επιχειρήματα. Αρχικά, η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας παραμένει κατά προσέγγιση σταθερή καθώς αλλάζει το κλίμα, γεγονός που οδηγεί το πραγματικό υετήσιμο νερό να κυμαίνεται ανάλογα με την τιμή κορεσμού (Lenderink & Van Meijgaard, 2008). Συγχρόνως, τα έντονα ύψη βροχόπτωσης καθορίζονται κυρίως από το υετήσιμο νερό που βρίσκεται ήδη στην ατμόσφαιρα, ενώ η φύση της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, με τις ανοδικές κυρίως κινήσεις που παράγουν βροχοπτώσεις, δεν αλλάζει σημαντικά. Για το τελευταίο υπάρχουν αμφιβολίες, εντούτοις σε μικρής κλίμακας βροχοπτώσεις αστάθειας, η αυξημένη απελευθέρωση λανθάνουσας θερμότητας μπορεί να ισχυροποιήσει περαιτέρω τις ανοδικές κινήσεις οδηγώντας σε ένα

scaling που υπερβαίνει την σχέση Clausius-Clapeyron (super CC) (Lenderink & Van Meijgaard, 2008). Παρόλα αυτά, η απόκριση των ακραίων βροχοπτώσεων με την κλιματική αλλαγή και η εξάρτηση των ακραίων με την θερμοκρασία στο παρόν κλίμα δεν είναι απαραίτητα η ίδια. Αφενός, η εξάρτηση στο παρόν κλίμα προέρχεται από μεταβολές από μέρα σε μέρα της θερμοκρασίας και βροχόπτωσης, οι οποίες και οι δύο προκαλούνται πρωτίστως από μεταβολές στη μεγάλης κλίμακας ατμοσφαιρική κυκλοφορία. Αφετέρου, μεγάλο μέρος της προβλεπόμενης μεταβολής στη βροχόπτωση δεν συνδέεται με τις αλλαγές στην μεγάλης κλίμακας κυκλοφορία. Ιδιαίτερα, η μεταβολή των ακραίων μπορεί να κυριαρχείται από θερμοδυναμικές διεργασίες. Σε μια τέτοια θεωρία της κλιματικής αλλαγής, κάθε ακραίο επεισόδιο στο παρόν κλίμα θεωρείται ότι συνδέεται με ένα παρόμοιο επεισόδιο στο μελλοντικό κλίμα, το οποίο συμβαίνει κάτω από μια αντίστοιχη ατμοσφαιρική κυκλοφορία, αλλά σε υψηλότερη θερμοκρασία και συνεπώς με μεγαλύτερο περιεχόμενο υδρατμών στην ατμόσφαιρα (Lenderink & Van Meijgaard, 2008). Σε αυτό το θεωρητικό πλαίσιο, η συχνότητα των έντονων φαινομένων δεν αλλάζει σημαντικά, αντιθέτως θεωρείται (βάσει αποτελεσμάτων) ότι η αύξηση στην ένταση του κάθε επεισοδίου δύναται να προβλεφθεί με τις σχέσεις (scaling relations) του παρόντος κλίματος.

Η άποψη ότι ο βαθμός στον οποίο η σχέση Clausius-Clapeyron ελέγχει την ένταση των ακραίων βροχοπτώσεων με τη θερμοκρασία παραμένει σταθερός και συνεπώς καθίσταται εφικτό να χρησιμοποιηθεί και στο μέλλον επιβεβαιώνεται και από παλαιοκλιματολογικά στοιχεία. Η ανάλυση ποτάμιων ιζηματογενών αποθέσεων στην βόρεια Ισπανία, χρονολογημένων στην περίοδο εκτεταμένης θέρμανσης του Παλαιοκαίνου-Ηωκαίνου (56 εκατομμύρια χρόνια πριν), κατέδειξε ότι η απορροή των ποταμών αυξήθηκε κατά τουλάχιστον 1,35 φορές κατά την χρονική αυτή φάση (Chen et al., 2018). Αν θεωρηθεί ότι οι βροχοπτώσεις ακολουθούν το ρυθμό της αύξησης κατά $7\%/^{\circ}\text{C}$ βάσει της σχέσης CC και αν πενταπλασιαστεί αυτή η τιμή, για να αντιστοιχεί με την αύξηση κατά 5°C της θερμοκρασίας που σημειώθηκε κατά την περίοδο εκτεταμένης θέρμανσης του Παλαιοκαίνου-Ηωκαίνου, τότε η αύξηση της βροχόπτωσης θα ήταν περίπου 35-40%, δηλαδή 1,4 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με την περίοδο πριν την εκτεταμένη θέρμανση. Όπως αναφέρεται παραπάνω, η αύξηση βρέθηκε να είναι τουλάχιστον κατά 1,35 (και πιθανά φτάνει και τις

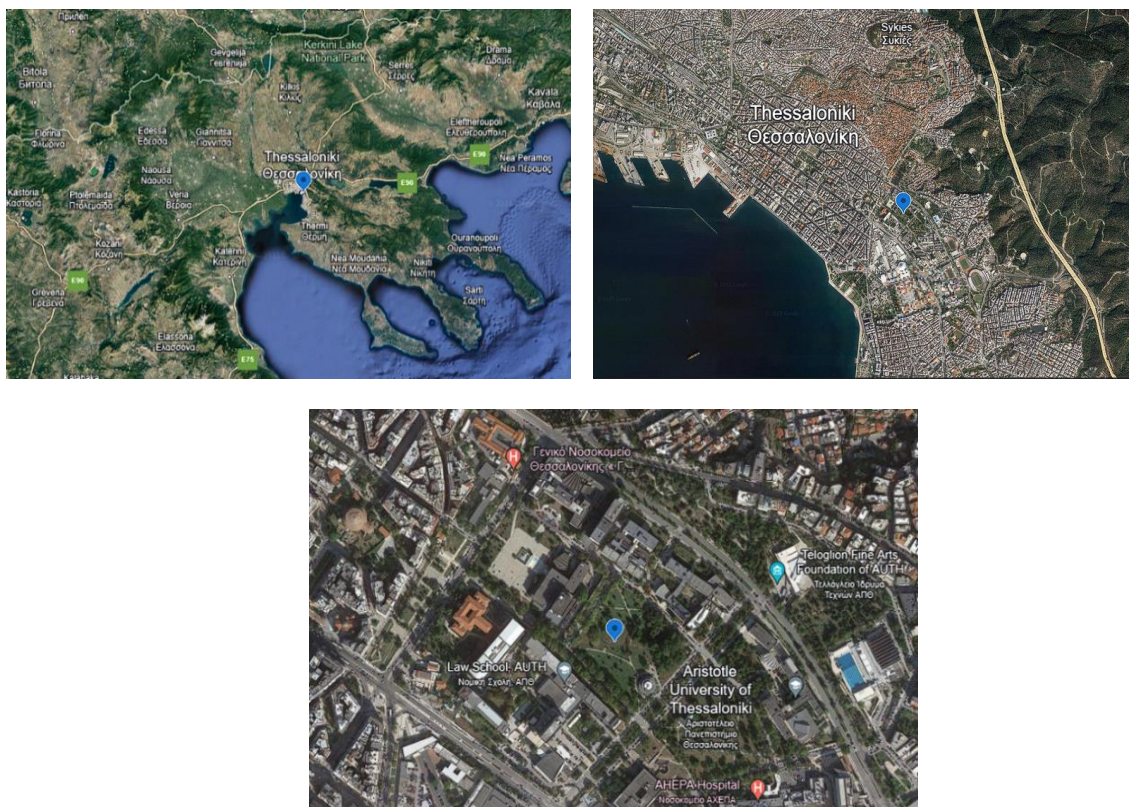
14) φορές μεγαλύτερη. Επομένως, οι ακραίες βροχοπτώσεις αυξήθηκαν σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας σε ρυθμό που πιθανά υπερβαίνει κατά πολύ τον ρυθμό του CC scaling.

Η μελέτη της εξέλιξης της σχέσης βροχοπτώσεων-θερμοκρασίας στο μελλοντικό κλίμα της Μεσογείου, φανερώνει ότι το θερμοκρασιακό όριο, πάνω από το οποίο η σχέση παύει να ισχύει, μεταβαίνει σε υψηλότερες θερμοκρασίες κατά μια τιμή κοντά στη μέση μεταβολή της θερμοκρασίας εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής (Drobinski et al., 2018). Μολονότι το hook shape, που αναφέρθηκε προηγουμένως, αποκλίνει σημαντικά από το CC-scaling ($7\%/^{\circ}\text{C}$), η εξέλιξη του φαίνεται να ακολουθεί καλά τον νόμο CC. Η προέλευση της εξέλιξης της καμπύλης συνάδει με τον νόμο Clausius-Clapeyron υποδεικνύοντας ότι η σχετική υγρασία παραμένει σταθερή σε ένα θερμότερο κλίμα, με μια απλή μεταβολή της κατανομής σε μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασίας. Η Μεσόγειος θάλασσα είναι μια πολύ μεγάλη πηγή υγρασίας για την περιοχή, και καθώς αυξάνεται το περιεχόμενο υδρατμών της ατμόσφαιρας με την αύξηση της θερμοκρασίας (ακολουθώντας τον νόμο Clausius-Clapeyron), μπορεί να διατηρεί την σχετική υγρασία σταθερή σε ένα θερμαινόμενο κλίμα, τουλάχιστον για μια γεωγραφική περιοχή που βρίσκεται υπό την επιρροή της. Η περιοχή αυτή περιορίζεται από τις διάφορες οροσειρές και στην ηπειρωτική Ευρώπη σε υψηλές θερμοκρασίες η σχετική υγρασία ελαττώνεται σημαντικά.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη του scaling των ακραίων βροχοπτώσεων με τη θερμοκρασία και το σημείο δρόσου σε ημερήσια και υπό-ημερήσια κλίμακα για την Θεσσαλονίκη από δεδομένα παρατηρήσεων και reanalysis. Η σχέση των ακραίων επεισοδίων με τη θερμοκρασία καθορίζεται με τη χρήση δύο διαφορετικών μεθοδολογιών, της μεθόδου Quantile Regression και της μεθόδου Binning. Παράλληλα, επιχειρείται μια προσπάθεια μείωσης της υποεκτίμησης των δεδομένων reanalysis με την εφαρμογή των σχέσεων από τις παρατηρήσεις σε αυτά. Επιπλέον, μελετάται η μελλοντική μεταβολή των ακραίων βροχοπτώσεων με την χρήση του περιοχικού μοντέλου ICTP-RegCM4-6, αφού πρώτα πραγματοποιηθεί έλεγχος πιθανής υποεκτίμησης. Τέλος, γίνεται προσπάθεια βελτιωμένης πρόγνωσης των ακραίων επεισοδίων από το μοντέλο WRF βάση των υπολογισμένων σχέσεων με σκοπό την έγκαιρη πρόληψη.

2.1. Παρατηρήσεις

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας με στόχο την εκτίμηση της σχέσης των ακραίων βροχοπτώσεων με τη θερμοκρασία για την πόλη της Θεσσαλονίκης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον μετεωρολογικό σταθμό του τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Ο σταθμός βρίσκεται στο κέντρο της πανεπιστημιούπολης με γεωγραφικό πλάτος: 40.6319, γεωγραφικό μήκος: 22.95735 και υψόμετρο 32 m και λειτουργεί από το 1930 παρέχοντας ένα αρχείο ενενήντα και πλέον ετών. Συγκεκριμένα, αξιοποιήθηκαν ωριαία δεδομένα βροχόπτωσης, θερμοκρασίας στα 2m και σημείου δρόσου για την περίοδο 1951-2021.



Εικόνα 1: Θέση μετεωρολογικού σταθμού (πηγή: Google Earth)



2.4. Περιοχικό μοντέλο WRF

Χρησιμοποιήθηκαν τα προγνωστικά δεδομένα για τις παραμέτρους της θερμοκρασίας και βροχόπτωσης από το αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης Weather Research and Forecasting (WRF) του τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Το μοντέλο ολοκληρώνεται σε τρία επάλληλα πλέγματα χωρικής διακριτοποίησης 15 x 15 km για την περιοχή της Ευρώπης (d01), 5 x 5 km που καλύπτει την Ελληνική περιοχή (d02) και 1,667 x 1,667 km που καλύπτει την περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας (d03). Οι αρχικές και οριακές συνθήκες δίνονται από το παγκόσμιο αριθμητικό μοντέλο GFS.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στην πλειοψηφία των εργασιών διεθνώς, για την εκτίμηση του παρατηρούμενου scaling των ακραίων βροχοπτώσεων με τη θερμοκρασία χρησιμοποιείται η μέθοδος binning σε διάφορες παραλλαγές και τροποποιήσεις. Σύμφωνα με αυτήν, οι θερμοκρασίες χωρίζονται σε κλάσεις (bins) με σταθερό εύρος θερμοκρασίας, συνήθως μεταξύ 1°C και 3°C και στη συνέχεια υπολογίζονται τα ανώτερα ποσοστημόρια για κάθε θερμοκρασιακή κλάση (Martinkova & Kysely, 2020). Μια δεύτερη μέθοδος που χρησιμοποιείται συχνά ως εναλλακτική της μεθόδου binning είναι η χρήση ενός γραμμικού μοντέλου παλινδρόμησης ποσοστημορίων (quantile regression model). Σε αυτή την περίπτωση εν αντιθέσει με την απλή γραμμική παλινδρόμηση, εκτιμάται η επίδραση της ανεξάρτητης μεταβλητής σε ένα επιλεγμένο ποσοστημόριο της εξαρτημένης μεταβλητής αντί για την μέση τιμή μόνο. Επιπλέον η μέθοδος είναι πιο αποτελεσματική ως προς τις ακραίες τιμές και επιτρέπει μια πιο απλή αναφορά των στατιστικών αβεβαιοτήτων σε σχέση με την μέθοδο binning (Schroeer & Kirchengast, 2018). Για να εκτιμηθεί η σχέση των ανώτερων ποσοστημορίων της βροχόπτωσης με τη θερμοκρασία στο σταθμό του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης, χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο παραπάνω μεθοδολογίες, με στόχο αφενός την καλύτερη μελέτη του scaling στα δεδομένα του σταθμού και αφετέρου την σύγκριση των δύο μεθόδων. Η εφαρμογή των παραπάνω μεθοδολογιών πραγματοποιήθηκε με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού R.

3.1. ΜΕΘΟΔΟΣ QUANTILE REGRESSION

Η μέθοδος quantile regression χρησιμοποιήθηκε στα ωριαία και τρίωρα δεδομένα βροχόπτωσης, τόσο ως προς την μέση ημερήσια θερμοκρασία, όσο και ως προς το μέσο ημερήσιο σημείο δρόσου. Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από τους Van de Vyver et al., 2019 η οποία εφαρμόστηκε σε δεδομένα σταθμών της κεντρικής Ευρώπης και Σκανδιναβίας. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόζει δύο διαφορετικά γραμμικά μοντέλα στα δεδομένα βροχόπτωσης. Ένα απλό γραμμικό μοντέλο που εφαρμόζεται στα ανώτερα ποσοστημόρια για όλο το εύρος

θερμοκρασιών και ένα δεύτερο μοντέλο που χρησιμοποιεί piecewise linear quantile regression, στο οποίο καθορίζεται ένα σημείο καμπής, το οποίο αποτελεί το θερμοκρασιακό όριο πάνω από το οποίο η σχέση μεταβάλλεται και συνεπώς αλλάζει η κλίση της ευθείας. Το δεύτερο μοντέλο, σχεδιάστηκε βασιζόμενο στις παρατηρήσεις, σύμφωνα με τις οποίες, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο της εισαγωγής, οι ακραίες βροχοπτώσεις ακολουθούν θετικό scaling με τη θερμοκρασία το οποίο κυμαίνεται κοντά σε αυτό που ορίζει η σχέση CC (7%/°C) μέχρι κάποια θερμοκρασία και από εκεί και έπειτα ακολουθούν μεγαλύτερο (>7%/°C, super-CC), μικρότερο (<7%/°C, sub-CC) ή και αρνητικό (<0%/°C) scaling.

Στο πρώτο μοντέλο, το οποίο καλείται «CC model», υπολογίζεται το scaling των ανώτερων ποσοστημορίων (τ) της ωριαίας βροχόπτωσης χρησιμοποιώντας τον λογάριθμο της βροχόπτωσης – $\log(P)$ με την θερμοκρασία ή το σημείο δρόσου ως μεταβλητή πρόβλεψης (predictor variable) ως εξής:

$$Q_{\tau}^{CC}(T) = \alpha + \beta T, \quad (1)$$

Όπου:

- β , η κλίση της ευθείας από την οποία προκύπτει το CC scaling
- T , η μέση ημερήσια θερμοκρασία ή το σημείο δρόσου

Το δεύτερο μοντέλο, το οποίο ονομάζεται «CC+ model» ή «change point model», καθώς υπολογίζει το σημείο καμπής της ευθείας του scaling, χρησιμοποιεί piecewise linear quantile regression ως εξής:

$$Q_{\tau}^{CC+}(T) = \begin{cases} \alpha_1 + \beta_1 T & \text{για } T \leq T_c \\ \alpha_2 + \beta_2 T & \text{για } T > T_c \end{cases} \quad (2)$$

Όπου:

- T_c , το θερμοκρασιακό όριο πάνω από το οποίο διαφοροποιείται η σχέση βροχόπτωσης-θερμοκρασίας

- β_1 , η κλίση της ευθείας πριν από το σημείο καμπής, η οποία αντιστοιχεί στον ρυθμό αύξησης που ορίζεται από την Clausius-Clapeyron (CC rate, 7%/°C)
- β_2 , η κλίση της ευθείας μετά το σημείο καμπής T_c , η οποία αντιστοιχεί σε ρυθμό μεγαλύτερο (>7%/°C, super-CC), μικρότερο (<7%/°C, sub-CC) ή και αρνητικό (<0%/°C) scaling.

Προκειμένου να βρεθεί σε κάθε περίπτωση ποιο από τα δύο μοντέλα αναπαριστά καλύτερα τα δεδομένα εφαρμόζεται το Bayesian Information Criterion (BIC). Σύμφωνα με αυτό, ελέγχονται δύο κύριοι παράγοντες: α) Το κατά πόσο το μοντέλο περιγράφει σωστά τα δεδομένα και β) Το πόσο πολύπλοκο είναι το μοντέλο.

$$BIC = -2 \log \hat{L} + p \ln (n),$$

Όπου:

- $\log \hat{L}$ μετράει πόσο καλά το μοντέλο ταιριάζει στα δεδομένα
- p ο αριθμός των παραμέτρων στο μοντέλο
- n ο αριθμός των περιπτώσεων

Για το μοντέλο CC ο αριθμός των παραμέτρων είναι $p=2$ ενώ για το CC+ είναι $p=4$. Κατά αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται ο βαθμός στον οποίο το μοντέλο ταιριάζει στα δεδομένα και παράλληλα εισάγονται βαθμοί ποινής για την πολυπλοκότητα του μοντέλου. Αυτοί οι δύο παράγοντες συνδυάζονται και επιλέγεται το μοντέλο με την μικρότερη τιμή BIC.

Επιπλέον, για να ελεγχθεί η ικανότητα του κάθε μοντέλου να αναπαριστά τα δεδομένα για ένα συγκεκριμένο ποσοστημόριο, εφαρμόζεται το goodness of fit criterion. Στο κριτήριο αυτό υπολογίζεται η τιμή R η οποία παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1 και όσο πλησιέστερα στο 1, τόσο καλύτερα αντιπροσωπεύει το μοντέλο τα δεδομένα για το συγκεκριμένο τ-ποσοστημόριο. Το goodness of fit criterion χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του αποδοτικότερου μοντέλου από τα δύο και παράλληλα για να επιλεγεί η καλύτερη μεταβλητή πρόβλεψης (predictor variable) ανάμεσα στη μέση ημερήσια θερμοκρασία και το σημείο δρόσου για το εκάστοτε ποσοστημόριο.

3.2. ΜΕΘΟΔΟΣ BINNING

Για τη μέθοδο Binning αναπτύχθηκε η μεθοδολογία κατά τα πρότυπα των Drobinski et al., 2018. Η μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε ωριαία, τρίωρα και ημερήσια δεδομένα του σταθμού χρησιμοποιώντας τη μέση ημερήσια θερμοκρασία και σημείο δρόσου. Αρχικά επιλέχθηκαν μόνο οι ώρες ή οι ημέρες αντίστοιχα με βροχόπτωση μεγαλύτερη από 0,1 mm. Η ταξινόμηση των παρατηρήσεων πραγματοποιήθηκε σε κλάσεις (bins) με σταθερό εύρος 2°C. Τα δεδομένα ταξινομήθηκαν σε αύξουσα σειρά με βάση τη μέση ημερήσια θερμοκρασία (αντίστοιχα για το σημείο δρόσου) και υπολογίστηκε η μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία προκειμένου να καθοριστεί το συνολικό εύρος. Στη συνέχεια διαχωρίστηκαν σε κλάσεις σταθερού εύρους 2°C και ταξινομήθηκαν σε αυτές ανάλογα με τη μέση θερμοκρασία κατά την ημέρα που σημειώθηκε η βροχόπτωση. Εν αντιθέσει με Drobinski et al., 2018 δεν χρησιμοποιήθηκε ίσος αριθμός περιπτώσεων σε κάθε κλάση, έτσι ώστε να μην παραληφθούν κάποιες περιπτώσεις, αλλά ταξινομήθηκαν όλες οι περιπτώσεις για την περίοδο αναφοράς. Προκειμένου να διασφαλιστεί η στατιστική σημαντικότητα, επιλέχθηκαν μόνο οι κλάσεις με τουλάχιστον 50 περιπτώσεις. Με αυτόν τον τρόπο εξαιρέθηκαν οι ανώτερες και κατώτερες κλάσεις τις κατανομής. Έπειτα υπολογίστηκε η μέση θερμοκρασία κάθε κλάσης, ενώ τέλος, για κάθε μια από αυτές, οι περιπτώσεις ταξινομήθηκαν κατά φθίνουσα σειρά και υπολογίστηκαν το 50°, 75°, 90°, 95°, 99° και 99,9° ποσοστημόριο.

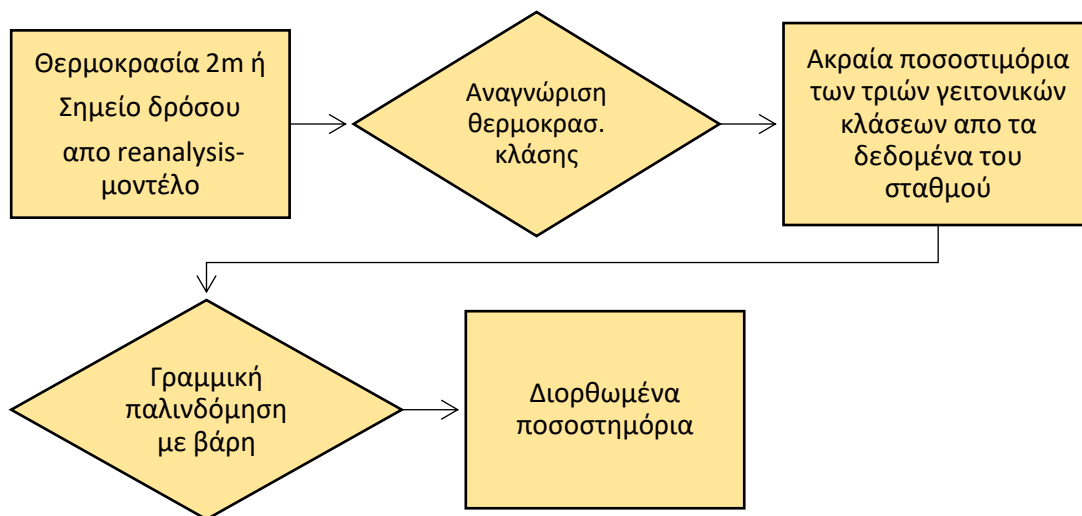
3.3. ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν οι παραπάνω μεθοδολογίες, από τις οποίες καθορίστηκε η σχέση μεταξύ των ακραίων βροχοπτώσεων με τη θερμοκρασία από τα δεδομένα του σταθμού, για να διορθωθούν δεδομένα reanalysis και αποτελέσματα προσομοιώσεων μοντέλων ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

Για την μεθοδολογία Quantile Regression αφού καθορίστηκαν οι γραμμικές σχέσεις για τα δεδομένα του σταθμού, αυτές εφαρμόζονται στα δεδομένα reanalysis και στα δεδομένα του μοντέλου. Χρησιμοποιώντας ως θερμοκρασία (T) τη μέση ημερήσια

θερμοκρασία ή το σημείο δρόσου από τα δεδομένα reanalysis (ή του μοντέλου αντίστοιχα) και έχοντας γνωστούς τους συντελεστές α , β (εξίσωση 1, σελ. 18) και $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ (εξίσωση 2, σελ. 18) για κάθε τ-ποσοστημόριο, προκύπτει η αναμενόμενη τιμή βροχόπτωσης του εκάστοτε ποσοστημορίου για αυτήν την θερμοκρασία.

Στην περίπτωση της μεθοδολογίας Binning η διαδικασία είναι πιο σύνθετη (Σχήμα 3.1). Δημιουργήθηκε συνάρτηση σε περιβάλλον R, η οποία δέχεται την τιμή θερμοκρασίας από τα δεδομένα reanalysis ή του μοντέλου και εξάγει τα ποσοστημόρια της βροχόπτωσης που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο αυτή βάση αυτής της θερμοκρασίας. Πρώτα αναγνωρίζεται η κλάση στην οποία ανήκει η θερμοκρασία, ελέγχεται αν η θερμοκρασία βρίσκεται μέσα στο αποδεκτό θερμοκρασιακό εύρος και εξάγονται τα ποσοστημόρια της κλάσης. Στη συνέχεια εξάγονται τα ποσοστημόρια των δύο γειτονικών κλάσεων (της ανώτερης και της κατώτερης) και με βάση την απόσταση της δοθείσας θερμοκρασίας από τις μέσες θερμοκρασίες των δύο αυτών κλάσεων καθορίζονται βάρη για τις τρεις κλάσεις. Τέλος πραγματοποιείται γραμμική παλινδρόμηση χρησιμοποιώντας τα βάρη των γειτονικών κλάσεων και υπολογίζονται τα ποσοστημόρια για την θερμοκρασία αυτή. Η συνάρτηση αυτή εφαρμόζεται για κάθε μια τιμή από τα δεδομένα reanalysis και τα δεδομένα του μοντέλου που πρόκειται να διορθωθούν και προκύπτει ένα νέο σύνολο με τα διορθωμένα, βάση της μεθόδου binning, δεδομένα.



Σχήμα 3.1: Διαδικασία υπολογισμού διορθωμένων ακραίων ποσοστημορίων βροχόπτωσης βάση της μεθόδου Binning.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

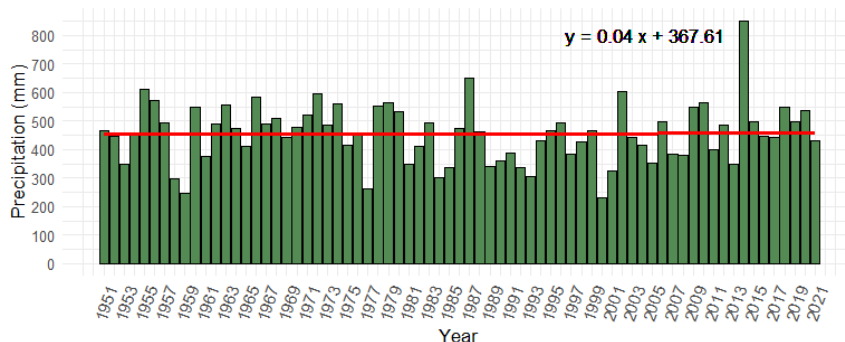
Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται αρχικά κλιματολογική ανάλυση των δεδομένων του μετεωρολογικού σταθμού με έμφαση στα ακραία επεισόδια βροχόπτωσης και εν συνεχεία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σχέσης των ακραίων βροχοπτώσεων με τη θερμοκρασία που προέκυψαν από την εφαρμογή των δύο μεθοδολογιών.

4.1. ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΚΡΑΙΩΝ ΕΠΕΙΣΟΔΙΩΝ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

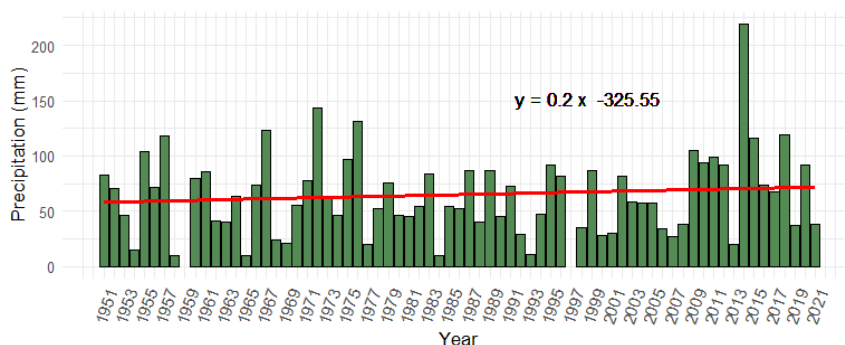
Αναλύθηκαν τα δεδομένα ωριαίας, τριώρης και ημερήσιας βροχόπτωσης του σταθμού για την περίοδο 1951-2021 με σκοπό να διερευνηθεί η ενδοημερήσια και ενδοετήσια κατανομή καθώς και οι τάσεις που παρουσιάζουν. Για τον προσδιορισμό της στατιστικής σημαντικότητας των τάσεων μεταβολής, πραγματοποιήθηκε ανάλυση απλής γραμμικής παλινδρόμησης, εκτελώντας t-test για τον συντελεστή κλίσης. Το επίπεδο σημαντικότητας τέθηκε στο 0.05. Επιπλέον μελετάται η κατανομή των μέσων ημερήσιων θερμοκρασιών και σημείου δρόσου κατά τις ημέρες με ισχυρά επεισόδια.

Όσον αφορά τα ετήσια ύψη βροχής, η μέση ετήσια βροχόπτωση του σταθμού για την περίοδο αναφοράς 1951-2021 ανέρχεται κατά μέσο όρο στα 455.4mm με ένα εύρος που κυμαίνεται από 230.8mm (2000) έως 851.6mm (2014) (Σχήμα 4.1.1). Τα ετήσια ύψη βροχής δεν εμφανίζουν αξιόλογη τάση μεταβολής. Αντιθέτως, αν μελετηθεί η συνεισφορά μόνο των ακραίων ωριαίων επεισοδίων (επεισόδια που υπερβαίνουν το 99^ο ποσοστημόριο της κατανομής) στην ετήσια βροχόπτωση τότε παρατηρείται αυξητική τάση η οποία ωστόσο δεν είναι στατιστικά σημαντική στη στάθμη σημαντικότητας 0.05 (Σχήμα 4.1.2). Τα ακραία επεισόδια αυτά συνεισφέρουν κατά μέσο όρο 65 mm ανά έτος με το μέγιστο να εμφανίζεται το 2014, όπου οι ακραίες ωριαίες βροχοπτώσεις άφησαν αθροιστικά 219,6 mm. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το Σχήμα 4.1.3, στο οποίο υπολογίστηκε η συνολική ποσοστιαία συνεισφορά των ωριαίων ακραίων επεισοδίων στη συνολική ετήσια βροχόπτωση. Κατά μέσο όρο τα πολύ ακραία επεισόδια (>99^ο ποσοστημόριο)

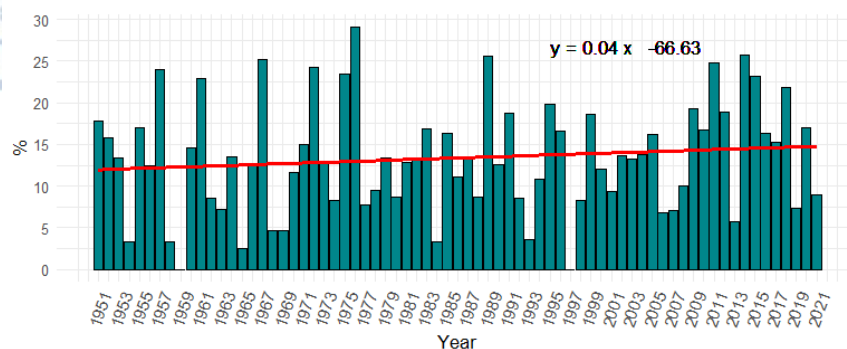
συνεισφέρουν στο 13,38% της ετήσιας βροχόπτωσης με την μέγιστη συνεισφορά να σημειώνεται το 1976 όπου συνολικά το 29,11% του συνολικού ετήσιου υετού οφειλόταν σε έντονες βροχοπτώσεις. Η συνεισφορά των ακραίων στην συνολική ετήσια βροχόπτωση παρουσιάζει αυξητική τάση κατά την περίοδο μελέτης ωστόσο και σε αυτήν την περίπτωση αυτή δεν είναι στατιστικά σημαντική.



Σχήμα 4.1.1: Συνολική ετήσια βροχόπτωση στο μετεωρολογικό σταθμό του ΑΠΘ. Η ευθεία αντιπροσωπεύει τη γραμμική τάση.

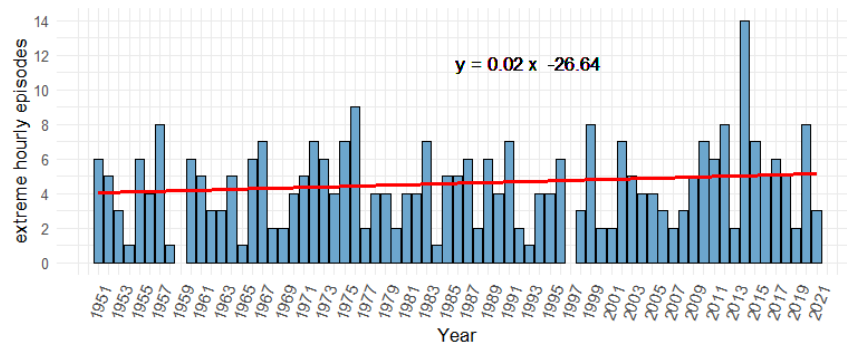


Σχήμα 4.1.2: Συνολική ετήσια βροχόπτωση μόνο από ωριαία ακραία επεισόδια (>99^ο ποσοστημόριο). Η ευθεία αντιπροσωπεύει τη γραμμική τάση.

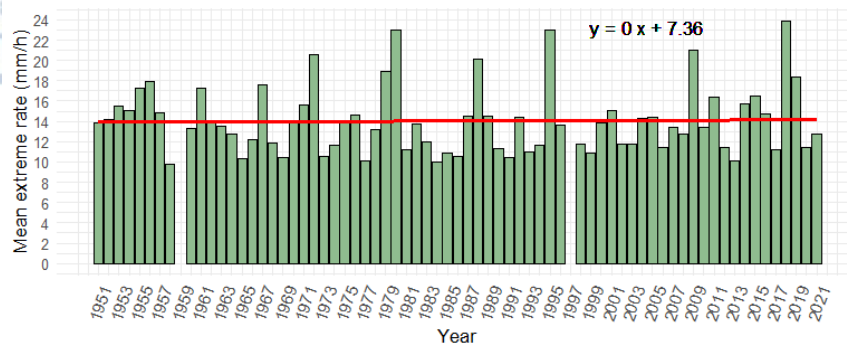


Σχήμα 4.1.3: Συνολική ποσοστιαία συνεισφορά (%) των ωριαίων ακραίων επεισοδίων στη συνολική βροχόπτωση του έτους. Η ευθεία αντιπροσωπεύει τη γραμμική τάση.

Ο αριθμός των ωριαίων επεισοδίων ανά έτος που υπερβαίνουν σε ένταση το 99^ο ποσοστημόριο παρουσιάζει μικρή αύξηση (όχι στατιστικά σημαντική) (Σχήμα 4.1.4). Κατά μέσο όρο εκδηλώνονται 4,6 τέτοια επεισόδια ανά έτος με το μέγιστο να εμφανίζεται το 2014 με συνολικά 14 επεισόδια. Η μέση ετήσια ένταση των ακραίων επεισοδίων δεν παρουσιάζει μεταβολή κατά την περίοδο 1951-2021 (Σχήμα 4.1.5), η μέση τιμή της είναι 14 mm/h με τη μέγιστη να φτάνει τα 23,9 mm/h (2018).

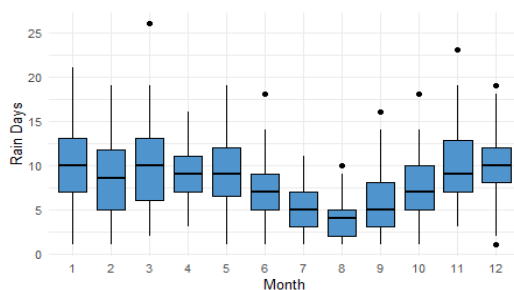


Σχήμα 4.1.4 : Αριθμός ακραίων ωριαίων επεισοδίων (>99^ο ποσοστημόριο) ανά έτος. Η ευθεία αντιπροσωπεύει τη γραμμική τάση.

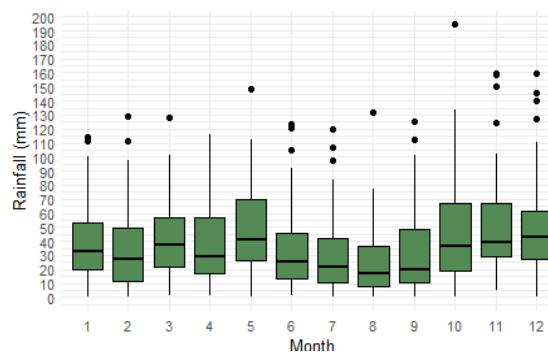


Σχήμα 4.1.5 : Μέση ένταση των ακραίων επεισοδίων (>99^ο ποσοστημόριο) ανά έτος. Η ευθεία αντιπροσωπεύει τη γραμμική τάση.

Οι μήνες με το μεγαλύτερο αριθμό ημερών βροχής είναι κατά κύριο λόγο οι χειμερινοί και οι μήνες την άνοιξης (Σχήμα 4.1.6). Συγκεκριμένα ο μεγαλύτερος αριθμός εμφανίζεται τον Δεκέμβριο, τον Ιανουάριο και τον Μάρτιο με μέσο όρο κοντά στις 10 ημέρες. Ακολουθούν ο Νοέμβριος με 9,8 ημέρες και ο Μάιος με 9,2. Οι μήνες με τον χαμηλότερο αριθμό ημερών βροχής είναι ο Αύγουστος με μέσο όρο 4 ημέρες βροχής, ο Ιούλιος με 5,2 και ο Σεπτέμβριος με 5,6 ημέρες. Όσον αφορά τα ύψη βροχής ανά μήνα (Σχήμα 4.1.7), οι υγρότεροι μήνες είναι ο Δεκέμβριος και ο Νοέμβριος με μέσο όρο 51mm και 50mm αντίστοιχα ενώ τρίτος κατά σειρά και κοντά στους δύο πρώτους βρίσκεται ο Μάιος με 47,8mm και έπειτα ο Οκτώβριος με 45,3mm. Οι πιο ξηροί μήνες και από άποψη συνολικού υετού είναι και πάλι ο Ιούλιος, Αύγουστος και Σεπτέμβριος με 29,2mm, 23,2mm και 32,7mm αντίστοιχα. Η μεγαλύτερη μηνιαία βροχόπτωση καταγράφηκε τον Οκτώβριο του 2010 με 194,6 mm.

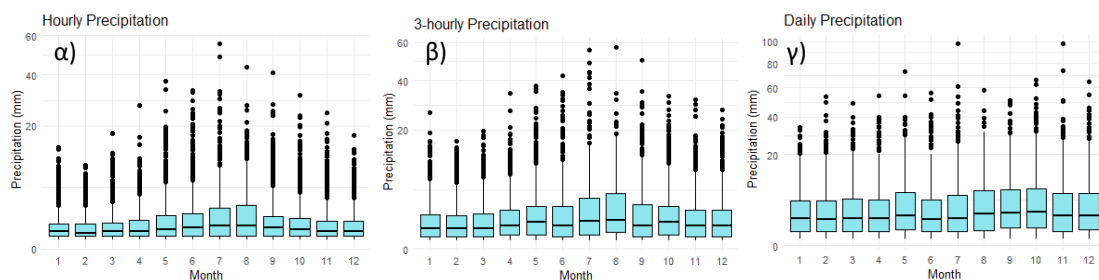


Σχήμα 4.1.6: Θηκογράμματα του αριθμού ημερών βροχόπτωσης (>0,1mm) ανά μήνα για την περίοδο 1951-2021.

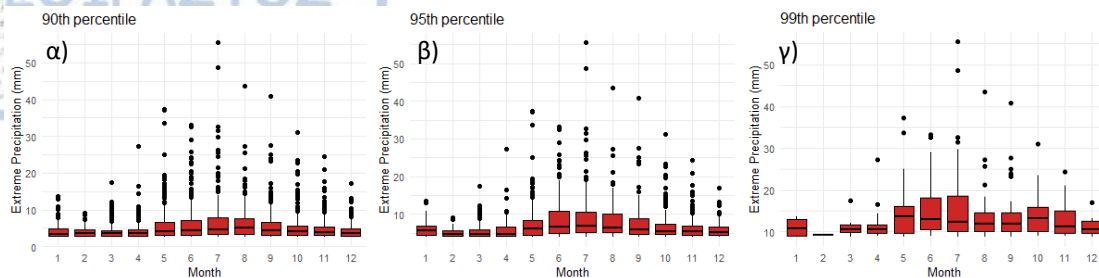


Σχήμα 4.1.7: Θηκογράμματα του μέσου ύψους βροχής ανά μήνα για την περίοδο 1951-2021.

Στην περίπτωση των ωριαίων βροχοπτώσεων, η ενδοετήσια κατανομή παρουσιάζει αντιθετη εικόνα. Τα μεγαλύτερα ύψη ωριαίας βροχόπτωσης εντοπίζονται κατά τους θερινούς μήνες (Σχήμα 4.1.8-α). Αντίστοιχη συμπεριφορά εμφανίζουν και τα τρίωρα ύψη βροχής (Σχήμα 4.1.8-β). Το παραπάνω μπορεί να ερμηνευθεί από την φύση και προέλευση του υετού κατά τη διάρκεια του έτους. Την θερινή περίοδο τα οργανωμένα συστήματα είναι σπάνια πάνω από την ευρύτερη περιοχή της Ελλάδος. Τόσο οι ημέρες βροχής όσο και τα συνολικά ύψη βροχόπτωσης είναι πολύ μικρά, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, και οι όποιες βροχές εμφανίζονται είναι με την μορφή όμβρων από νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης που δημιουργούνται κυρίως από θερμικά αίτια (θερμικές καταιγίδες). Συνεπώς η ένταση των θερινών βροχοπτώσεων είναι αναμενόμενα μεγαλύτερη κατά μέσο όρο σε σχέση με τις άλλες εποχές όπου εκτός των όμβρων ο υετός παράγεται από οργανωμένα συστήματα τα οποία αποτελούνται από νέφη με στρωματόμορφα χαρακτηριστικά και έχει συνήθως μικρότερες εντάσεις. Το παραπάνω γίνεται αντιληπτό και από την μελέτη των ωριαίων ακραίων τιμών (Σχήμα 4.1.9) όπου τα μεγαλύτερα ύψη ακραίας βροχόπτωσης εντοπίζονται τους θερινούς μήνες του έτους. Στην περίπτωση των ημερήσιων βροχοπτώσεων (Σχήμα 4.1.8-γ), παρατηρείται μια σχετική ισορροπία ανάμεσα στους μήνες. Τα μεγαλύτερα ημερήσια ύψη βροχής εντοπίζονται το τρίμηνο Αύγουστο-Οκτώβριο και τον Μάιο με μέσο όρο κοντά στα 2,5mm ανά ημέρα.

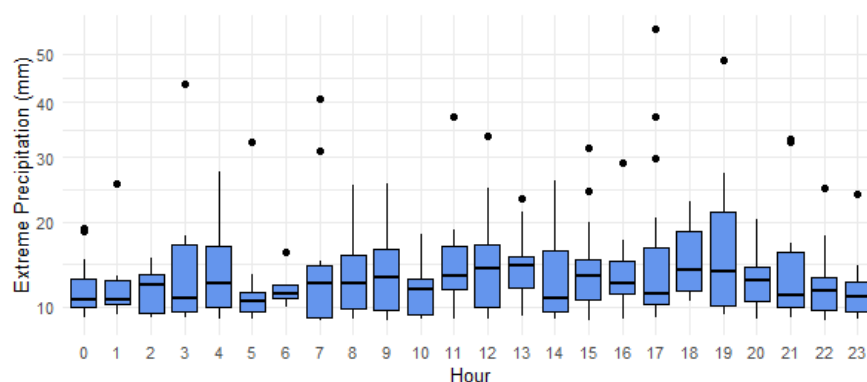


Σχήμα 4.1.8: Θηκογράμματα της έντασης των επεισοδίων βροχής ανά μήνα, α) για τις ωριαίες, β) τρίωρες και γ) ημερήσιες τιμές.



Σχήμα 4.1.9: Θηκογράμματα της έντασης των ωριαίων ακραίων επεισοδίων βροχής ανά μήνα, α) για το 90^ο, β) το 95^ο και γ) το 99^ο ποσοστημόριο της κατανομής.

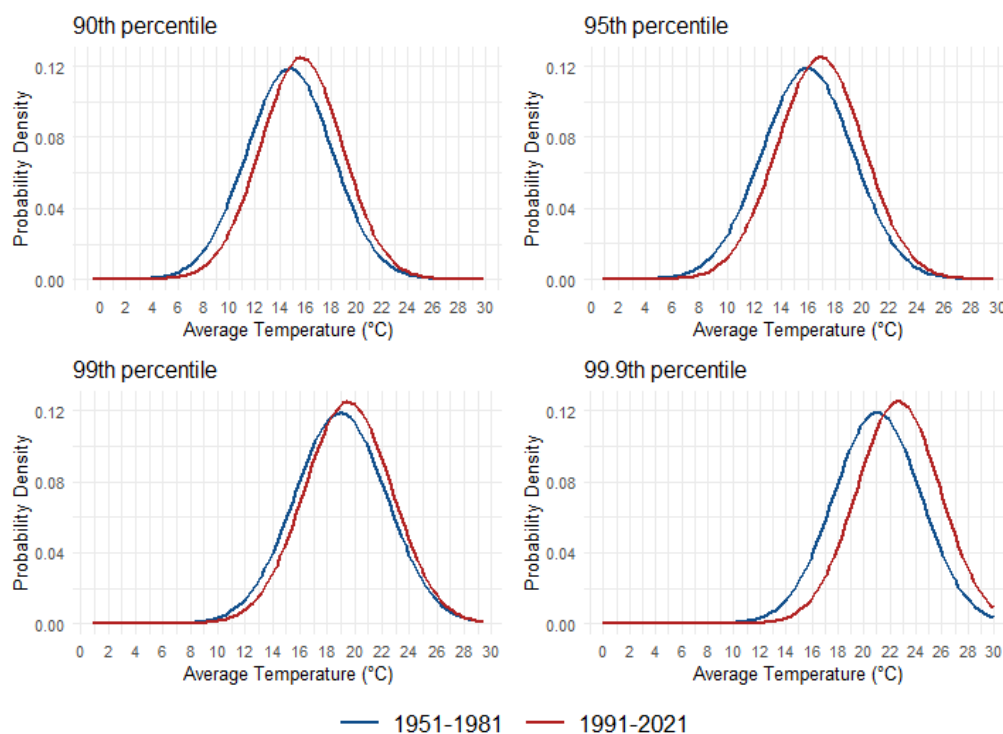
Η κατανομή των ωριαίων βροχοπτώσεων κατά τη διάρκεια του 24ώρου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.10. Παρότι δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές, διακρίνεται ότι τα μεγαλύτερα ακραία ύψη βροχής κατά μέσο όρο εντοπίζονται κυρίως κατά τις ώρες της ημέρας και όχι της νύχτας και συγκεκριμένα μεταξύ 7 το πρωί και 7 το απόγευμα.



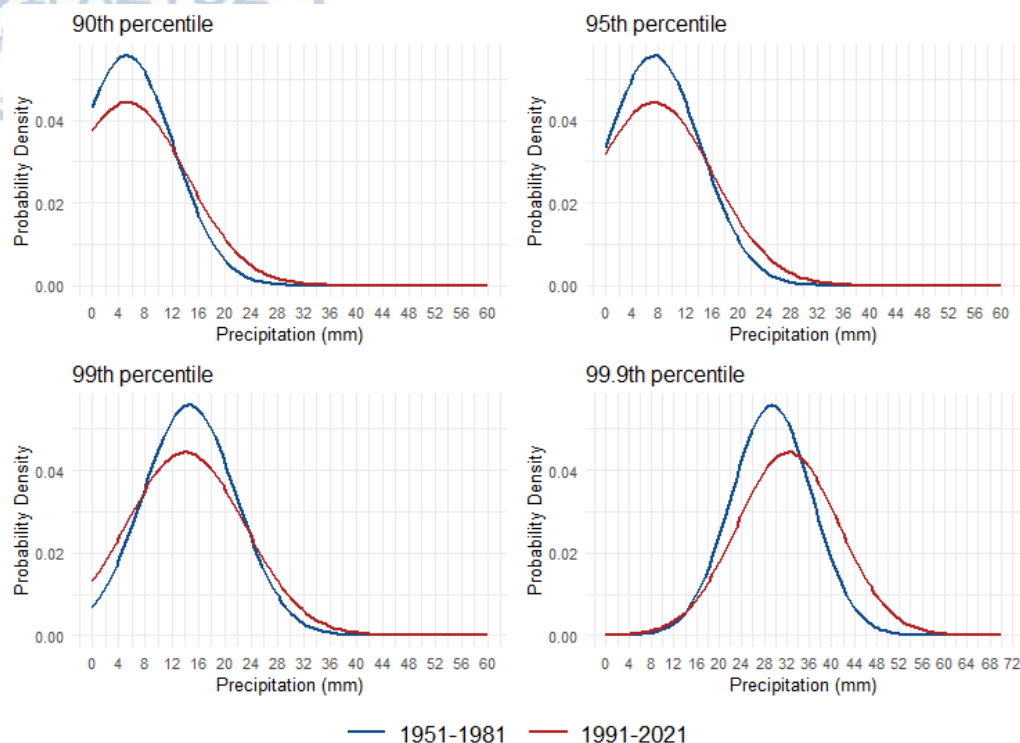
Σχήμα 4.1.10: Θηκογράμματα της έντασης των ωριαίων βροχοπτώσεων ανά ώρα της ημέρας.

Εν συνεχεία, υπολογίστηκαν οι Probability Distribution Functions (PDFs) των ανώτερων ποσοστημορίων της ωριαίας βροχόπτωσης με τη θερμοκρασία χωρίζοντας την περίοδο αναφοράς σε δύο υποπεριόδους με σκοπό να μελετηθεί τυχόν μεταβολή. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν τα πρώτα τριάντα χρόνια της περιόδου αναφοράς (1951-1981) και τα τελευταία τριάντα (1991-2021). Η πιθανότητα εμφάνισης των ακραίων δεν έχει μεταβληθεί ιδιαίτερα από την πρώτη στην τελευταία τριακονταετία. Παρατηρείται ότι και για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια, η μέγιστη πιθανότητα εμφάνισης εντοπίζεται σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες κατά την πρόσφατη περίοδο (1991-2021) σε σχέση με την αρχική (1951-1981) (Σχήμα 4.1.11). Για το 90^ο ποσοστημόριο η θερμοκρασία που εμφανίζεται το

μέγιστο της συχνότητας μεταβαίνει από τους 14,5°C στους 16 °C, για το 95^ο από τους 15,8 °C στους 17 °C, για το 99^ο από τους 19 °C στους 19,7 °C και για το 99,9^ο από τους 21°C στους 22,6 °C από την πρώτη στη δεύτερη περίοδο αντίστοιχα. Προκύπτει συνεπώς ότι οι ακραίες βροχοπτώσεις κατά την τελευταία τριακονταετία της περιόδου μελέτης εμφανίζονται σε υψηλότερες κατά περίπου 1-1,5°C θερμοκρασίες. Η μετάβαση αυτή ακολουθεί την αύξηση στη μέση ημερήσια θερμοκρασία που καταγράφεται στην πόλη της Θεσσαλονίκης μεταξύ των δύο αυτών περιόδων. Η μέση ημερήσια θερμοκρασία έχει αυξηθεί κατά 0,6 °C (από 16 °C σε 16,6 °C) μεταξύ των δύο περιόδων και κατά 0,9 °C από 11,5 °C (1951-1981) σε 12,4 °C (1991-2021) αν ληφθούν υπόψιν μόνο οι ημέρες βροχής. Από τις καμπύλες PDF ως προς την ένταση βροχής (Σχήμα 4.1.12), διακρίνεται αύξηση στην ένταση των πολύ ακραίων επεισοδίων (>99.9 ποσοστημόριο) ενώ για τα υπόλοιπα ακραία ποσοστημόρια δεν υπάρχει αλλαγή. Ωστόσο η καμπύλη γίνεται πιο πλατύκυρτη υποδηλώνοντας αύξηση στην πιθανότητα μεγαλύτερων εντάσεων και για τα υπόλοιπα ποσοστημόρια.



Σχήμα 4.1.11: Probability Distribution Functions (PDFs) των τεσσάρων ανώτερων ποσοστημορίων της ωριαίας βροχόπτωσης σε σχέση με τη θερμοκρασία. Με μπλε για την περίοδο 1951-1981 και με κόκκινο για την περίοδο 1991-2021.



Σχήμα 4.1.12: Probability Distribution Functions (PDFs) των τεσσάρων ανώτερων ποσοστημορίων της ωριαίας βροχόπτωσης ως προς την ένταση αυτής. Με μπλε για την περίοδο 1951-1981 και με κόκκινο για την περίοδο 1991-2021.

4.2. ΣΧΕΣΗ ΑΚΡΑΙΩΝ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ-ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

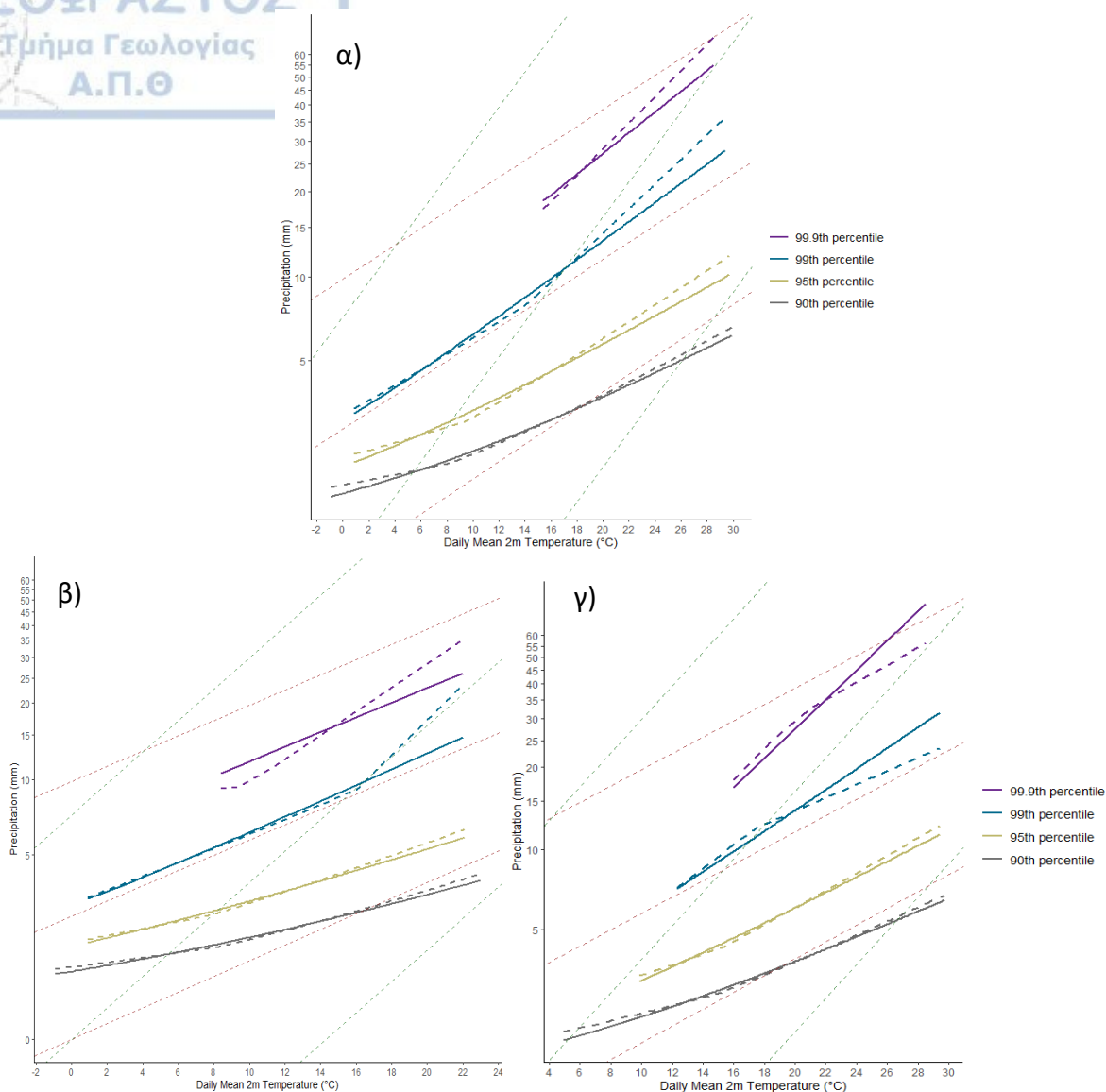
Για τον καθορισμό της σχέσης που εμφανίζουν οι ακραίες βροχοπτώσεις στον σταθμό της Θεσσαλονίκης με την θερμοκρασία χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές μεθοδολογίες. Υπολογίστηκαν οι σχέσεις των ωριαίων, τριώρων και ημερήσιων εντάσεων βροχόπτωσης για τα ανώτερα ποσοστημόρια της κατανομής. Για την παράμετρο της θερμοκρασίας αξιοποιήθηκε η μέση ημερήσια θερμοκρασία και το σημείο δρόσου κατά την ημέρα των επεισοδίων με στόχο την διερεύνηση της καλύτερης μεταβλητής πρόβλεψης.

4.2.1. ΩΡΙΑΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

4.2.1.1. Μέθοδος Quantile regression

Αρχικά υπολογίστηκε ο ρυθμός αύξησης των ακραίων βροχοπτώσεων με την θερμοκρασία και το σημείο δρόσου με την εφαρμογή της μεθόδου Quantile Regression (Σχήμα

4.2.1 και Π.1 αντίστοιχα). Για σύγκριση, δίνονται με διακεκομμένες γραμμές ο ρυθμός CC ($7\%/^{\circ}\text{C}$) (κόκκινο) και ο διπλάσιος (2CC) ($14\%/^{\circ}\text{C}$) (πράσινο). Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για ολόκληρη την χρονική περίοδο 1951-2021 (Σχήμα 4.2.1-α, Π.1-α) καθώς και ξεχωριστά για το ψυχρό (Οκτώβριος-Μάρτιος) (Σχήμα 4.2.1-β, Π.1-β) και θερμό (Απρίλιος-Σεπτέμβριος) εξάμηνο (Σχήμα 4.2.1-γ, Π.1-γ). Ο διαχωρισμός της περιόδου σε θερμό και ψυχρό εξάμηνο λαμβάνει χώρα για να διαπιστωθεί τυχόν διαφορετική συμπεριφορά των ακραίων βροχοπτώσεων με τη θερμοκρασία ανάλογα με το είδος του υετού. Γενικότερα, την χειμερινή περίοδο επικρατεί στρωματόμορφος τύπος υετού ενώ την θερινή σημαντικό ποσοστό του συνολικού υετού εκδηλώνεται με μορφή όμβρων αστάθειας. Στον Πίνακα 4.2.1 και Π.7 παρουσιάζεται ο ρυθμός αύξησης των ανώτερων ποσοστημορίων της βροχόπτωσης με τη θερμοκρασία και το σημείο δρόσου αντίστοιχα όπως προκύπτει από την κλίση των ευθείων β ($\%/^{\circ}\text{C}$) για το μοντέλο CC και β_1, β_2 για το μοντέλο CC+ με το αντίστοιχο θερμοκρασιακό όριο T_c . Και για τα δύο αυτά μοντέλα, για την συνολική περίοδο καθώς και τις δύο υποπεριόδους δίνονται οι αναλυτικοί πίνακες των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή της μεθοδολογίας των Van de Vyver et al.(2019) (Πίνακες Π.1-Π.6). Όπως προαναφέρθηκε, το Bayesian Information Criterion (BIC) βοηθά να καθοριστεί ποιο από τα δύο μοντέλα (CC ή CC+) υπερτερεί για κάθε ποσοστημόριο, με το μοντέλο με την μικρότερη τιμή BIC να είναι αυτό που επιλέγεται. Στους ίδιους πίνακες, δίνεται και η τιμή $R(\%)$ για το goodness of fit criterion. Παρόλο που οι διαφορές είναι μικρές, η τιμή του $R(\%)$ είναι μεγαλύτερη με χρήση της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας από ότι με το σημείο δρόσου και για τις τρεις χρονικές περιόδους καθώς και για τα δύο γραμμικά μοντέλα. Το γεγονός αυτό φανερώνει ότι για τον σταθμό της Θεσσαλονίκης, η μέση θερμοκρασία αποτελεί καλύτερη μεταβλητή πρόβλεψης (predictor variable) για την σχέση ακραίων βροχοπτώσεων-θερμοκρασίας συγκριτικά με το σημείο δρόσου. Επομένως δίνεται έμφαση στη μελέτη της σχέσης με την μέση ημερήσια θερμοκρασία.



Σχήμα 4.2.1: Σχέση ωριαίας βροχόπτωσης με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια βάση της μεθόδου Quantile Regression. α) για το σύνολο της περιόδου 1951-2021, β) για την περίοδο Οκτωβρίου-Μαρτίου (χειμερινό εξάμηνο), γ) για την περίοδο Απριλίου-Σεπτεμβρίου (θερινό εξάμηνο). Δίνονται για σύγκριση: ο ρυθμός CC (7%/°C) (κόκκινες διακεκομμένες) και ο 2CC (14%/°C) (πράσινες διακεκομμένες).

Παρατηρείται ότι η βροχόπτωση του 90^{ου} ποσοστημορίου ακολουθεί αύξηση με τη θερμοκρασία μικρότερη του ρυθμού που ορίζει η σχέση Clausius-Clapeyron (<7 %/°C, sub-CC) τόσο για την συνολική περίοδο όσο και για το χειμερινό και θερινό εξάμηνο. Ο μεγαλύτερος ρυθμός αύξησης εντοπίζεται το θερινό εξάμηνο (+5,7 %/°C) και ο μικρότερος το χειμερινό (+4,8 %/°C) για το μοντέλο CC. Αντίστοιχα είναι τα αποτελέσματα και για το μοντέλο CC+ με ελαφρώς μεγαλύτερη αύξηση μετά το σημείο καμπής T_c . Η

βροχόπτωση του 95^{ου} ποσοστημορίου ακολουθεί αύξηση με τη θερμοκρασία πιο κοντά σε αυτήν που ορίζεται από την CC. Συγκεκριμένα με το μοντέλο CC+ η βροχόπτωση εμφανίζει αύξηση +7 %/°C για την περίοδο 1951-2021, ενώ για την θερινή περίοδο υπερβαίνει την CC με +7,7 %/°C. Το χειμερινό εξάμηνο εμφανίζει sub-CC αύξηση. Οι πολύ ακραίες βροχοπτώσεις (99^ο και 99,9^ο ποσοστημόριο), παρουσιάζουν σημαντική αύξηση με τη θερμοκρασία που υπερβαίνει τον ρυθμό που ορίζεται από την σχέση CC (super-CC) ιδιαίτερα κατά το θερινό εξάμηνο. Συγκεκριμένα, με το μοντέλο CC για το 99^ο ποσοστημόριο η αύξηση κυμαίνεται από 7,2 %/°C κατά το χειμερινό εξάμηνο έως 8,7 %/°C το θερινό με τις αντίστοιχες τιμές για το 99,9^ο ποσοστημόριο να είναι +6,6 %/°C και +12,3 %/°C. Ακόμα μεγαλύτεροι είναι οι ρυθμοί αύξησης όπως προκύπτουν από το μοντέλο CC+. Σύμφωνα με αυτό, το 99^ο ποσοστημόριο για την συνολική περίοδο αναφοράς ακολουθεί αύξηση κοντά σε αυτή που ορίζει η CC (6,8 %/°C) μέχρι το θερμοκρασιακό όριο των 14,1 °C και στη συνέχεια super-CC (+9,9 %/°C). Αντίστοιχη συμπεριφορά εμφανίζει και ο υετός της χειμερινής περιόδου με την αύξηση μετά το σημείο καμπής ($T_c=16,1$ °C) να είναι υπερδιπλάσια του ρυθμού CC (>2CC) με +15,8 %/°C. Την θερινή περίοδο, εντοπίζεται αύξηση 9,9 %/°C μέχρι τους 17,7 °C και στη συνέχεια +5,6 %/°C (sub-CC). Στην περίπτωση του 99,9^{ου} ποσοστημορίου, το μοντέλο CC+ δεν εντοπίζει τάση πριν το σημείο καμπής για την συνολική περίοδο και για το χειμερινό εξάμηνο, καθώς δεν υπάρχουν επεισόδια που να ανήκουν στο ανώτερο 99,9% για θερμοκρασίες μικρότερες των 9,5 °C και 9,7 °C. Για υψηλότερες θερμοκρασίες οι πολύ ακραίες βροχοπτώσεις αυξάνονται με ρυθμό +10,5%/°C (συνολική περίοδος) και +10,7% (χειμερινό εξάμηνο). Κατά το θερινό εξάμηνο, εντοπίζεται scaling κοντά στο 2CC με +13,3 %/°C για μέση ημερήσια θερμοκρασία μικρότερη των 18,5 °C ενώ για υψηλότερες θερμοκρασίες ακολουθεί τον ρυθμό CC (+7,3 %/°C).

Πίνακας 4.2.1: Ρυθμός αύξησης των ανώτερων ποσοστημορίων της ωριαίας βροχόπτωσης με την μέση ημερήσια θερμοκρασία για την εκάστοτε περίοδο και ποσοστημόριο από τα δύο μοντέλα (CC, CC+) της μεθόδου Quantile Regression, όπως καθορίζεται από την κλίση θ (CC) και θ_1, θ_2 (CC+) των ευθειών. Για το μοντέλο CC+ δίνεται το θερμοκρασιακό όριο (T_c) κάθε ποσοστημορίου. Σημειωμένο με γκρι, είναι το καλύτερο μοντέλο σύμφωνα με την μέθοδο BIC (πίνακες Π.1-Π.6). Τονίζονται οι τιμές που υπερβαίνουν τον ρυθμό CC.

	P90				P95				P99				P99.9			
	CC	CC+			CC	CC+			CC	CC+			CC	CC+		
	θ	θ_1	θ_2	$T_c (^{\circ}C)$	θ	θ_1	θ_2	$T_c (^{\circ}C)$	θ	θ_1	θ_2	$T_c (^{\circ}C)$	θ	θ_1	θ_2	$T_c (^{\circ}C)$
1951-2021	5,4	3,4	5,9	8,1	5,9	4	7	9,3	7,7	6,8	9,9	14,1	8,3	1,2	10,5	9,5
1951-2021 Χειμερινό εξάμηνο	4,8	3,5	5,5	8	5,2	4,1	6	8	7,2	6,8	15,8	16,1	6,6	1,3	10,7	9,7
1951-2021 Θερινό εξάμηνο	5,7	4,3	6,2	15,1	6,7	5	7,5	15,1	8,7	9,9	5,6	17,7	12,3	13,3	7,3	18,5

Με βάση τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι κατά τη συνολική περίοδο 1951-2021, οι ακραίες βροχοπτώσεις ακολουθούν παρόμοια συμπεριφορά με αυτήν των βροχοπτώσεων του χειμερινού εξαμήνου. Αυτό πιθανόν οφείλεται στο γεγονός ότι η πλειοψηφία των ημερών βροχής λαμβάνει χώρα κατά το χειμερινό εξάμηνο (Οκτώβριος-Μάρτιος). Οι ακραίες βροχοπτώσεις του θερινού εξαμήνου εμφανίζουν μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης με τη θερμοκρασία και για τα τέσσερα επιλεγμένα ποσοστημόρια, επιβεβαιώνοντας τις μελέτες που υποδεικνύουν ότι οι βροχοπτώσεις που συνδέονται με αστάθεια παρουσιάζουν εντονότερο scaling από ότι οι στρωματόμορφες (Berg et al., 2013; Molnar et al., 2015). Το 95^ο ποσοστημόριο της ωριαίας βροχόπτωσης ακολουθεί αύξηση με τη θερμοκρασία όμοια με αυτήν που ορίζει η σχέση Clausius-Clapeyron ενώ στο 99^ο και 99,9^ο ο ρυθμός αύξησης είναι μεγαλύτερος (super CC). Για το 90^ο η αύξηση είναι μικρότερη από 7 %/ $^{\circ}C$ (sub-CC).

Στην περίπτωση του σημείου δρόσου (Πίνακας Π.13, Σχήμα Π.1) οι ρυθμοί αύξησης με τη θερμοκρασία είναι μικρότεροι με το μοντέλο CC, ενώ το εντονότερο scaling παρατηρείται όταν μελετάται ολόκληρη η περίοδος 1951-2021 και όχι το θερινό εξάμηνο. Με το μοντέλο CC παρατηρείται sub-CC scaling (<7%/ $^{\circ}C$) για το 90^ο, 95^ο και 99^ο ποσοστημόριο και CC scaling για το 99,9^ο. Το μοντέλο CC+ δίνει μεγαλύτερες αυξήσεις που υπερβαίνουν

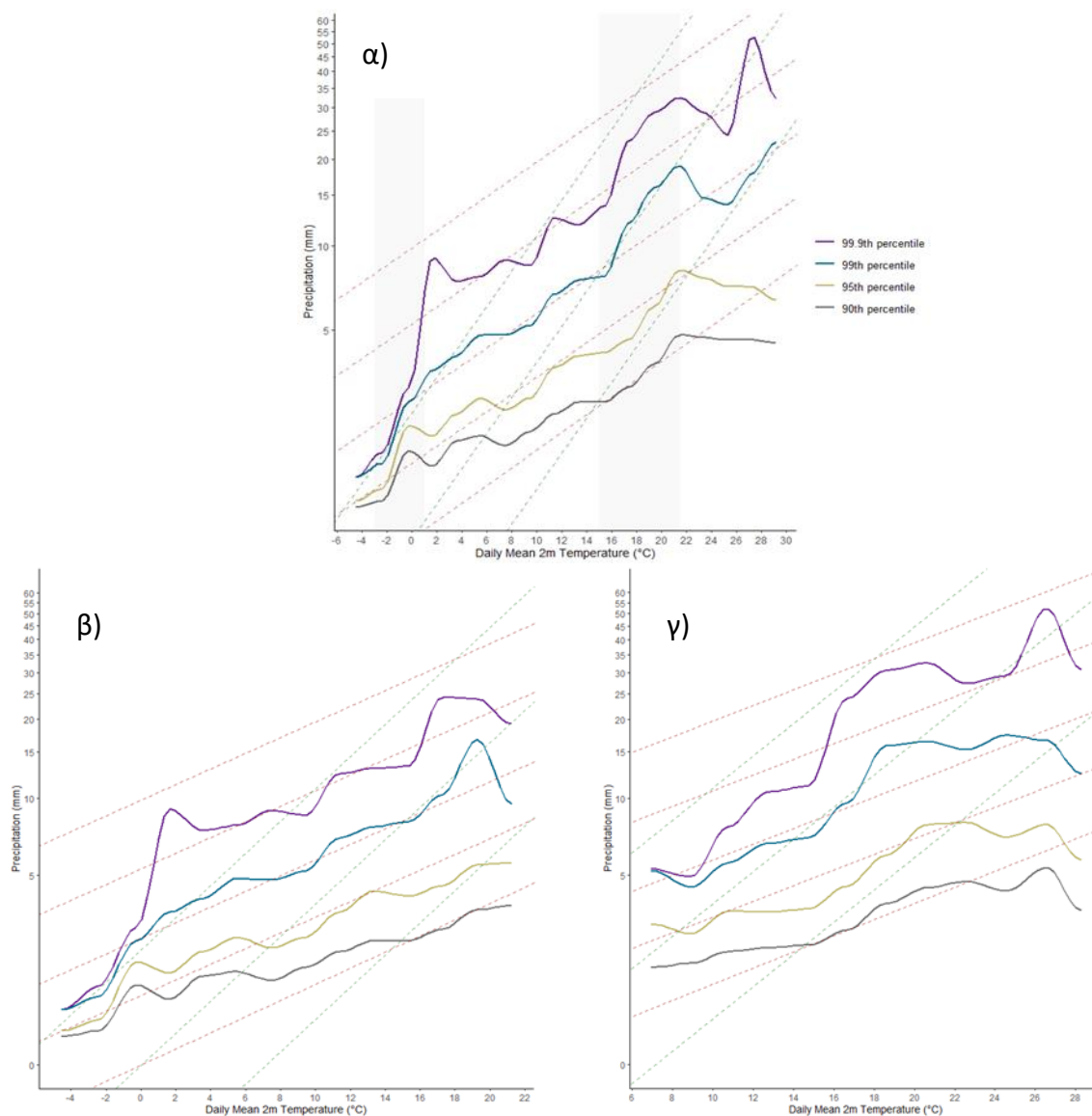
την σχέση CC για το 99° και 99,9° (super-CC, >7%/°C). Για το 99,9° ιδιαίτερα ο βαθμός αύξησης των βροχοπτώσεων με τη θερμοκρασία πλησιάζει τα 2CC (14%/°C).

4.2.1.2. Μέθοδος Binning

Με βάση την μεθοδολογία binning υπολογίστηκε η κατανομή των ανώτερων ποσοστημορίων της ωριαίας βροχόπτωσης με τη θερμοκρασία για την περίοδο 1951-2021 για κλάσεις θερμοκρασίας ανά 2°C και με περιορισμό τουλάχιστον 50 περιπτώσεων ανά κλάση (Σχήμα 4.2.2-α). Δίνονται για σύγκριση με διακεκομμένες γραμμές ο ρυθμός CC (7%/°C) (κόκκινο) και ο διπλάσιος (2CC) (14%/°C) – super CC (πράσινο). Οι ωριαίες ακραίες εντάσεις εμφανίζουν αύξηση με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία με ρυθμό όμοιο και μεγαλύτερο από αυτόν που ορίζει η σχέση CC. Παρατηρείται super-CC scaling σε θερμοκρασίες -3 έως +1 °C και μεταξύ 15 και 21,5 °C όπου φτάνει τα 2CC. Για το 90° και 95° ποσοστημόριο η σχέση βροχόπτωσης-θερμοκρασίας γίνεται αρνητική για θερμοκρασίες >21,5 °C. Το ίδιο παρατηρείται και για το 99° και 99,9° ωστόσο για θερμοκρασίες >26 °C η σχέση γίνεται ξανά θετική και μάλιστα με ρυθμό κοντά στα 2CC. Κατά την ψυχρή περίοδο του έτους (Οκτώβριος-Μάρτιος) (Σχήμα 4.2.2-β), οι ωριαίες τιμές βροχόπτωσης ακολουθούν αύξηση με τη θερμοκρασία πολύ κοντά στο 7%/°C που ορίζεται από την Clausius-Clapeyron. Το 99° και 99.9° ποσοστημόριο υπερβαίνουν τον ρυθμό αυτό για θερμοκρασίες 15-18 °C και σε υψηλότερες ακολουθούν αρνητική σχέση. Την θερμή περίοδο (Απρίλιος-Σεπτέμβριος) (Σχήμα 4.2.2-γ) από τη μέθοδο binning προκύπτει αύξηση με ρυθμό κοντά στον CC έως τους 15 °C, εν συνεχεία και μέχρι τους 18-22°C η αύξηση υπερβαίνει το 7%/°C ενώ για το 99° και 99.9° υπερβαίνει και τα 2CC. Η σχέση γίνεται αρνητική σε θερμοκρασίες >26 °C.

Από την εφαρμογή της μεθόδου binning με χρήση του σημείου δρόσου αντί της μέσης θερμοκρασίας (Σχήμα Π.2) προκύπτει αύξηση της βροχόπτωσης με το σημείο δρόσου με ρυθμό κοντά σε αυτόν που ορίζει η Clausius-Clapeyron (7%/°C) για το 90° και 95° ποσοστημόριο και με μεγαλύτερο ρυθμό για το 99° και 99,9°. Για το 99,9° η αύξηση είναι της τάξης του 2CC (14%/°C) σε θερμοκρασίες 8-18 °C. Η σχέση γίνεται αρνητική για τιμές σημείου δρόσου που υπερβαίνουν τους 18 °C. Μικρότεροι ρυθμοί αύξησης παρατηρούνται

όταν η συνολική περίοδος χωρίζεται σε θερμή και ψυχρή. Για τις δύο υποπεριόδους, η σχέση βροχόπτωσης-σημείου δρόσου είναι όμοια με την αντίστοιχη της μέσης θερμοκρασίας με μια αύξηση κοντά στο $7\%/^{\circ}\text{C}$.



Σχήμα 4.2.2: Σχέση ωριαίας βροχόπτωσης με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια βάσει της μεθόδου Binning. α) για το σύνολο της περιόδου 1951-2021, β) για την περίοδο Οκτωβρίου-Μαρτίου (χειμερινό εξάμηνο), γ) για την περίοδο Απριλίου-Σεπτεμβρίου (θερινό εξάμηνο). Δίνονται για σύγκριση: ο ρυθμός CC ($7\%/^{\circ}\text{C}$) (κόκκινες διακεκομμένες) και ο 2CC ($14\%/^{\circ}\text{C}$) (πράσινες διακεκομμένες).

4.2.2. ΤΡΙΩΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

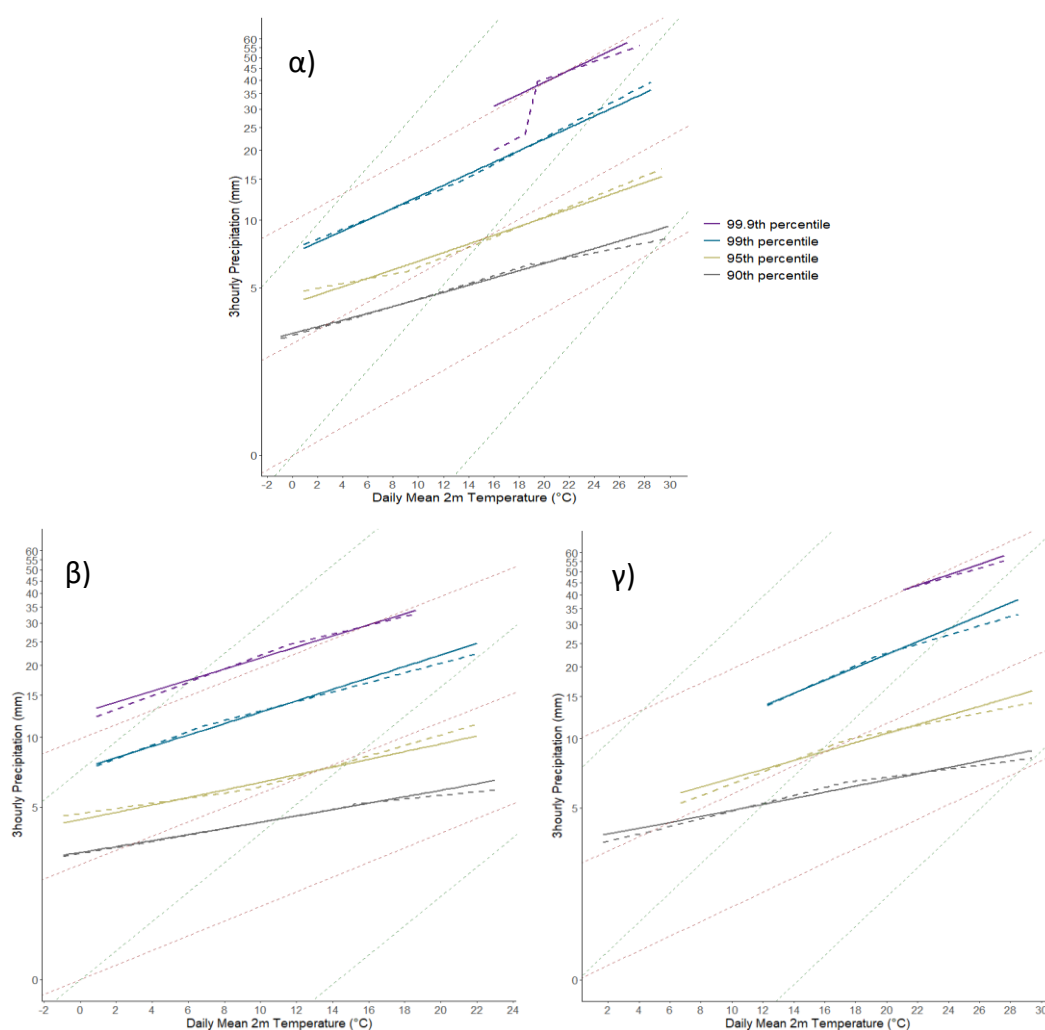
4.2.2.1. Μέθοδος Quantile regression

Η εφαρμογή της μεθόδου quantile regression στα ανώτερα ποσοστημόρια των τριώρων εντάσεων βροχής παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.3. Οι κλίσεις των ευθειών β_1, β_2 οι οποίες αντιστοιχούν στο ρυθμό αύξησης της έντασης των ακραίων με τη θερμοκρασία (σε $\%/^{\circ}\text{C}$) δίνονται στον Πίνακα 4.2.2 μαζί με το θερμοκρασιακό όριο T_c για το μοντέλο CC+. Προκύπτει, ότι οι τριώρες ακραίες βροχοπτώσεις ακολουθούν αύξηση με τη θερμοκρασία αλλά με ρυθμό μικρότερο από αυτόν που ορίζει η σχέση Clausius-Clapeyron ($<7\%/^{\circ}\text{C}$). Αυτή η sub-CC συμπεριφορά παρατηρείται τόσο στο σύνολο της περιόδου αναφοράς 1951-2021 (Σχήμα 4.2.3-α), όσο και στο χειμερινό (Σχήμα 4.2.3-β) και θερινό εξάμηνο (Σχήμα 4.2.3-γ). Σε αντίθεση με τις ωριαίες εντάσεις, η αύξηση την θερμή περίοδο δεν είναι η μεγαλύτερη. Η εντονότερη αύξηση με τη θερμοκρασία εντοπίζεται όταν το θερινό και χειμερινό εξάμηνο λαμβάνονται μαζί. Σύμφωνα με το Bayesian Information Criterion (BIC) (πίνακες Π.7-Π.12), το μοντέλο CC περιγράφει καλύτερα τα δεδομένα για το 90° , 95° και 99° ποσοστημόριο καθώς και για το $99,9^{\circ}$ κατά το θερινό εξάμηνο (Πίνακας 4.2.2).

Πίνακας 4.2.2: Ρυθμός αύξησης των ανώτερων ποσοστημορίων της τριώρης έντασης βροχόπτωσης με την μέση ημερήσια θερμοκρασία για την εκάστοτε περίοδο και ποσοστημόριο από τα δύο μοντέλα (CC, CC+) της μεθόδου Quantile Regression, όπως καθορίζεται από την κλίση β (CC) και β_1, β_2 (CC+) των ευθειών. Για το μοντέλο CC+ δίνεται το θερμοκρασιακό όριο (T_c) κάθε ποσοστημορίου. Σημειωμένο με γκρι, είναι το καλύτερο μοντέλο σύμφωνα με την μέθοδο BIC (πίνακες Π.7-Π.12). Τονίζονται οι τιμές που υπερβαίνουν τον ρυθμό CC.

	P90				P95				P99				P99.9			
	CC	CC+			CC	CC+			CC	CC+			CC	CC+		
	β	β_1	β_2	$T_c (^{\circ}\text{C})$	β	β_1	β_2	$T_c (^{\circ}\text{C})$	β	β_1	β_2	$T_c (^{\circ}\text{C})$	β	β_1	β_2	$T_c (^{\circ}\text{C})$
1951-2021	3,8	4,1	2,5	19	4,4	2,5	5,1	8,9	5,7	5,1	6,5	13,6	5,9	6,2	4,4	18,7
1951-2021 Χειμερινό εξάμηνο	3,3	3,4	1,9	15,1	3,8	2,6	5,1	9,3	5,5	6,6	4,6	6,8	5,3	6,5	4,2	11,5
1951-2021 Θερινό εξάμηνο	3,1	4	2	17,3	4,4	5,9	3	17,3	6,2	6,7	4,4	19	5	7,6	4,3	18,2

Με χρήση του σημείου δρόσου (Πίνακας Π.14), όπως και στην περίπτωση των ωριαίων δεδομένων, οι ρυθμοί αύξησης για κάθε ποσοστημόριο είναι μικρότεροι για το μοντέλο CC συγκριτικά με την χρήση της μέσης θερμοκρασίας. Οι βροχοπτώσεις παρουσιάζουν sub-CC αύξηση με το σημείο δρόσου και για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια. Με το μοντέλο CC+, για το χειμερινό εξάμηνο του έτους η αύξηση είναι $<7\%/^{\circ}\text{C}$ για όλα τα ποσοστημόρια. Αύξηση κοντά στο ρυθμό CC παρατηρείται για το 99^ο και 99,9^ο ποσοστημόριο. Super-CC ρυθμός εντοπίζεται μόνο για το 99,9^ο ποσοστημόριο της συνολικής περιόδου 1951-2021.

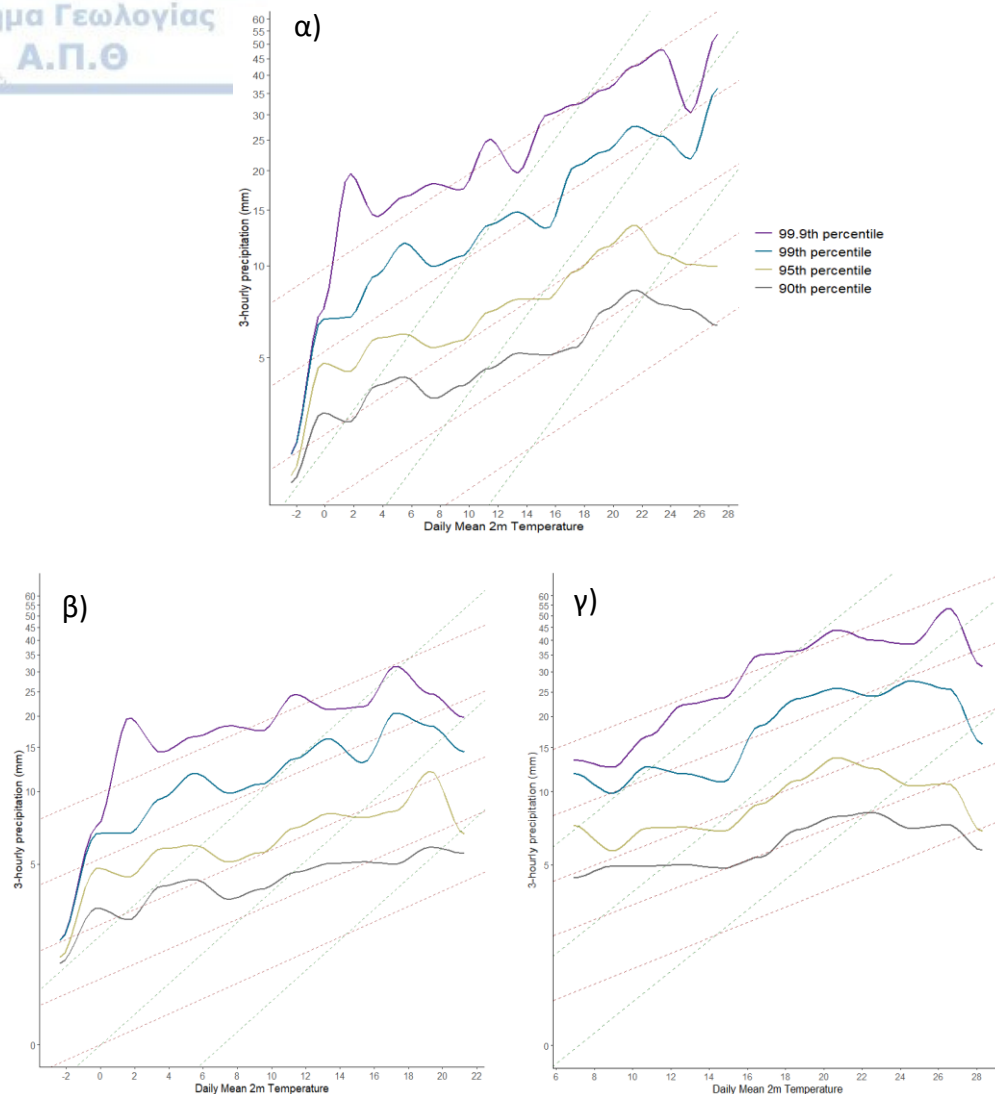


Σχήμα 4.2.3: Σχέση τριώρης έντασης βροχοπτώωσης με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια βάσει της μεθόδου Quantile Regression. α) για το σύνολο της περιόδου 1951-2021, β) για την περίοδο Οκτωβρίου-Μαρτίου (χειμερινό εξάμηνο), γ) για την περίοδο Απριλίου-Σεπτεμβρίου (θερινό εξάμηνο). Δίνονται για σύγκριση: ο ρυθμός CC ($7\%/^{\circ}\text{C}$) (κόκκινες διακεκομμένες) και ο 2CC ($14\%/^{\circ}\text{C}$) (πράσινες διακεκομμένες).

4.2.2.2. Μέθοδος Binning

Στην περίπτωση της μεθόδου binning (Σχήμα 4.2.4-α), για την συνολική περίοδο, οι ακραίες τιμές βροχόπτωσης ακολουθούν αύξηση με τη θερμοκρασία που βρίσκεται σε μεγάλη συμφωνία με την εξίσωση Clausius-Clapeyron. Συγκεκριμένα, το 95°, 99° και 99,9° ποσοστημόριο ακολουθούν τον ρυθμό CC για θερμοκρασίες από 2°C έως 22°C. Η βροχόπτωση του 90^{ου} ποσοστημορίου ακολουθεί sub-CC αύξηση. Σε θερμοκρασίες 18-22°C το 90° και 95° ποσοστημόριο αυξάνονται με ρυθμό που υπερβαίνει την CC και πλησιάζει τα 2CC. Η σχέση γίνεται αρνητική για θερμοκρασίες >22-24 °C. Κατά την ψυχρή περίοδο του έτους (Σχήμα 4.2.4-β), ο ρυθμός αύξησης της ακραίας βροχόπτωσης με τη θερμοκρασία υπερβαίνει το ρυθμό CC μεταξύ 2-6 °C και 10-14 °C. Η σχέση γίνεται αρνητική σε θερμοκρασίες >18-20°C. Την θερμή περίοδο (Σχήμα 4.2.4-γ), παρατηρείται αύξηση με τη θερμοκρασία που υπερβαίνει την σχέση CC (super-CC) και φτάνει ή και υπερβαίνει τα 2CC για θερμοκρασίες μεταξύ 15 και 21 °C. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες το scaling γίνεται αρνητικό.

Για το σημείο δρόσου (Σχήμα Π.4), σε αντίθεση με την μέθοδο quantile regression όπου η αύξηση ήταν χαμηλότερη συγκριτικά με την χρήση της μέσης θερμοκρασίας, παρατηρείται ρυθμός κοντά σε αυτόν που ορίζει η σχέση CC (7%/°C) και super-CC για σημείο δρόσου μεταξύ 8 και 18 °C. Η σχέση γίνεται αρνητική για $T_d > 15-18$ °C. Όταν λαμβάνεται η θερμή και ψυχρή περίοδος ξεχωριστά, τα τέσσερα ποσοστημόρια ακολουθούν όμοια μεταβολή με ρυθμό κοντά στον CC την ψυχρή περίοδο και ελαφρώς μεγαλύτερο κατά την θερμή (κυρίως για το 99° και 99,9°). Η σχέση διατηρείται θετική για σημείο δρόσου έως 16 °C τόσο στο χειμερινό όσο και στο θερινό εξάμηνο.



Σχήμα 4.2.4: Σχέση τριώρης έντασης βροχόπτωσης με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια βάσης της μεθόδου Binning. α) για το σύνολο της περιόδου 1951-2021, β) για την περίοδο Οκτωβρίου-Μαρτίου (χειμερινό εξάμηνο), γ) για την περίοδο Απριλίου-Σεπτεμβρίου (θερινό εξάμηνο). Δίνονται για σύγκριση: ο ρυθμός CC (7%/°C) (κόκκινες διακεκομμένες) και ο 2CC (14%/°C) (πράσινες διακεκομμένες).

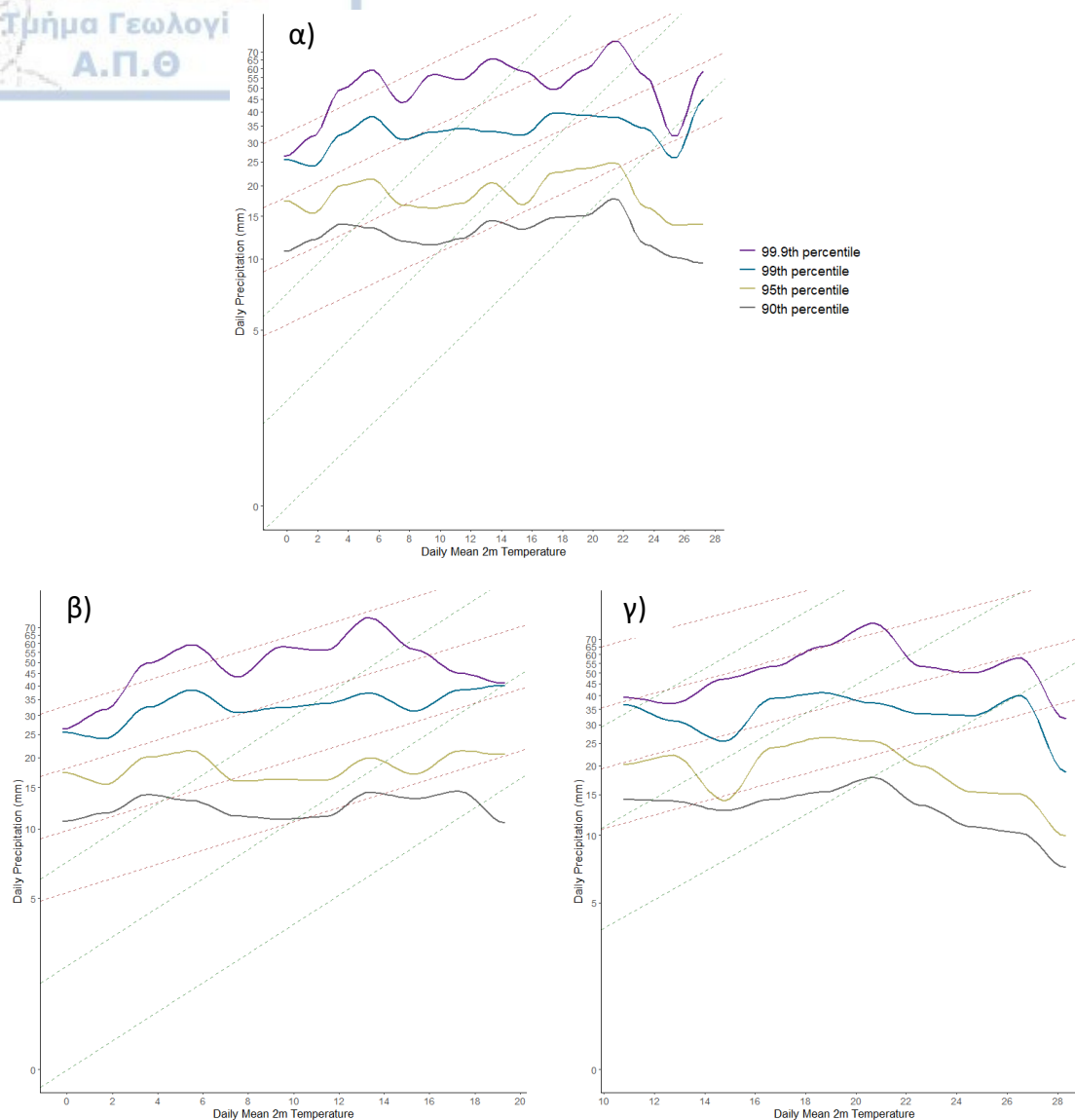
4.2.3. ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

Η μεθοδολογία Quantile Regression παρουσιάζει αδυναμία στον υπολογισμό των σχέσεων των ακραίων ημερήσιων τιμών βροχόπτωσης με τη θερμοκρασία καθώς έχει σχεδιαστεί για ωριαίες τιμές βροχόπτωσης. Για τον λόγο αυτό στα ημερήσια δεδομένα εφαρμόστηκε μόνο η μέθοδος Binning. Και σε αυτήν την περίπτωση μελετήθηκε η σχέση

για ολόκληρη την χρονοσειρά καθώς και ξεχωριστά για το χειμερινό και θερινό εξάμηνο.

Οι καμπύλες των ανώτερων ποσοστημορίων δίνονται στο Σχήμα 4.2.5. Η μεταβολή των ημερήσιων ακραίων τιμών με τη θερμοκρασία γίνεται με ρυθμό μικρότερο από αυτόν που ορίζει η σχέση CC. Σημαντική αύξηση παρατηρείται μέχρι τους 6 °C, ενώ για θερμοκρασίες από 6 °C έως 22 °C τα ακραία ημερήσια ύψη βροχής μένουν σχεδόν σταθερά με μια αύξηση μεταξύ 16-22 °C. Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες η σχέση γίνεται αρνητική εξαιρουμένων των 99^{ου} και 99,9^{ου} ποσοστημορίων που εμφανίζουν εκ νέου σημαντική αύξηση σε θερμοκρασίες 26-28 °C. Όμοια συμπεριφορά εντοπίζεται και με την διαίρεση των επεισοδίων σε χειμερινό και θερινό εξάμηνο (Σχήμα 4.2.5 β και γ αντίστοιχα). Τα ακραία επεισόδια την περίοδο Οκτωβρίου-Μαρτίου εμφανίζουν μια σχετική σταθερότητα με την θερμοκρασία, ιδιαίτερα το 90^ο και 95^ο ποσοστημόριο. Το θερινό εξάμηνο επικρατεί αντίστοιχη εικόνα για το 95^ο και 99^ο ποσοστημόριο ενώ το 90^ο και 99.9^ο εμφανίζουν αύξηση κοντά στο 7%/°C μέχρι τους 21 °C και στη συνέχεια πτώση.

Όμοια είναι τα αποτελέσματα και με την χρήση του σημείου δρόσου ως μεταβλητή πρόβλεψης (Σχήμα Π.5), με την μεταβολή των ακραίων να είναι μικρότερη από τον ρυθμό CC (sub-CC, <7%/°C) για θερμοκρασίες >0 °C και για τις τρεις περιόδους. Κατά το χειμερινό εξάμηνο (Σχήμα Π.5-β) δεν παρατηρείται αρνητικό scaling σε υψηλές τιμές σημείου δρόσου, ενώ για το θερινό εξάμηνο (Σχήμα Π.5-γ) το scaling γίνεται αρνητικό για το 90^ο και 95^ο ποσοστημόριο για σημείο δρόσου >10°C.

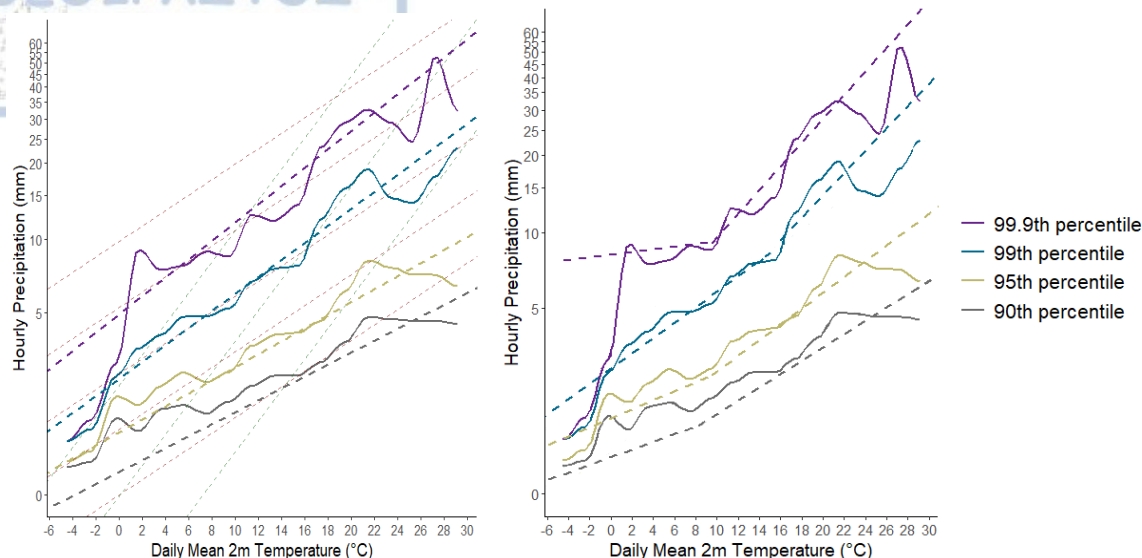


Σχήμα 4.2.5: Σχέση ημερήσιας βροχόπτωσης με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια βάσει της μεθόδου Binning. α) για το σύνολο της περιόδου 1951-2021, β) για την περίοδο Οκτωβρίου-Μαρτίου (χειμερινό εξάμηνο), γ) για την περίοδο Απριλίου-Σεπτεμβρίου (θερινό εξάμηνο). Δίνονται για σύγκριση: ο ρυθμός CC (7%/°C) (κόκκινες διακεκομμένες) και ο 2CC (14%/°C) (πράσινες διακεκομμένες).

4.2.4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ

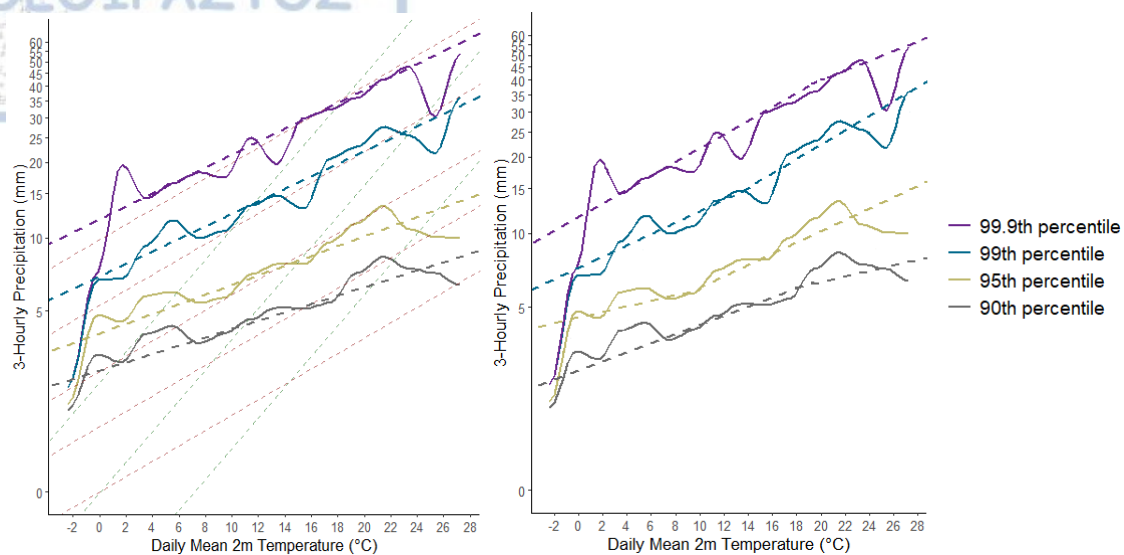
Η βασική διαφορά μεταξύ των μεθόδων Quantile Regression και Binning είναι ότι η πρώτη υπολογίζει τις σχέσεις των ακραίων βροχοπτώσεων με τη θερμοκρασία λαμβάνοντας υπόψιν τα ανώτερα ποσοστημόρια του συνόλου της κατανομής. Αντιθέτως, η δεύτερη υπολογίζει τα ποσοστημόρια κάθε θερμοκρασιακής κλάσης ξεχωριστά. Κατά αυτόν

τον τρόπο η μέθοδος binning συμπεριλαμβάνει περιπτώσεις που δεν ανήκουν απαραίτητα στα ακραία ποσοστημόρια της συνολικής κατανομής της βροχόπτωσης του σταθμού. Το τελευταίο αιτιολογεί την παρουσία των καμπυλών σε μικρές τιμές βροχόπτωσης για τις χαμηλότερες θερμοκρασίες που παρατηρείται στα ωριαία και τριώρα δεδομένα. Η μέθοδος binning μπορεί να λαμβάνει και μη ακραίες τιμές στα ανώτερα ποσοστημόρια, εντούτοις δίνει την δυνατότητα για αναλυτικότερη διερεύνηση της σχέσης βροχόπτωσης-θερμοκρασίας μεταξύ των ημερήσιων θερμοκρασιών. Μέσω της μεθόδου αυτής εντοπίζονται αυξομειώσεις στην κλίση των καμπυλών εντός της θερμοκρασιακής κατανομής το οποίο δεν είναι δυνατόν να συμβεί με την μέθοδο quantile regression, στην οποία υπολογίζεται η ευθεία που χαρακτηρίζει το εκάστοτε ποσοστημόριο του συνόλου των περιπτώσεων. Παράλληλα, καθίσταται δυνατός ο εντοπισμός της αρνητικής σχέσης στις υψηλότερες θερμοκρασίες (hook shape) καθώς και το θερμοκρασιακό όριο από το οποίο αρχίζει να ισχύει. Με εξαίρεση το τελευταίο, και οι δύο μεθοδολογίες είναι σε θέση να περιγράψουν επαρκώς την συμπεριφορά που παρουσιάζουν οι ακραίες τιμές σε σχέση με τη θερμοκρασία για τον μετεωρολογικό σταθμό της Θεσσαλονίκης. Από το Σχήμα 4.2.6 στο οποίο παρουσιάζονται οι τιμές των ανώτερων ποσοστημορίων σε σχέση με τη θερμοκρασία με τις δύο μεθοδολογίες, διακρίνεται σχετικά καλή ταύτιση των δύο. Η σημαντικότερη απόκλιση των δύο μεθοδολογιών λαμβάνει χώρα στις χαμηλότερες και υψηλότερες θερμοκρασίες. Επιπλέον, σημαντική είναι η απόκλιση που παρατηρείται μεταξύ των δύο μεθοδολογιών για το 90^ο ποσοστημόριο.



Σχήμα 4.2.6: Σύγκριση των μεθοδολογιών *Quantile Regression* (διακεκομμένες γραμμές) και *Binning* (συνεχείς γραμμές) για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια της ωριαίας βροχόπτωσης με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία. Αριστερά σύγκριση του μοντέλου CC με την μέθοδο *Binning*, δεξιά σύγκριση του μοντέλου CC+ με την μέθοδο *Binning*. Δίνονται για σύγκριση: ο ρυθμός CC (7%/°C) (κόκκινες διακεκομμένες) και ο 2CC (14%/°C) (πράσινες διακεκομμένες).

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο μεθοδολογιών για τις τρίωρες ακραίες εντάσεις (Σχήμα 4.2.7), από τη μέθοδο *binning* προκύπτει και πάλι ότι οι τρίωρες τιμές παρουσιάζουν διαφορετική διακύμανση σε συγκεκριμένες θερμοκρασιακές κλάσεις. Το γεγονός αυτό αποτελεί την αιτία που με την μέθοδο *quantile regression* ο ρυθμός αύξησης είναι μικρότερος από 7 %/°C εξαιτίας της αδυναμίας καταγραφής του hook shape που παρατηρείται με την αρνητική σχέση στις υψηλότερες θερμοκρασίες και το οποίο επηρεάζει την κλίση της ευθείας της *quantile regression*. Συγκριτικά με τα ωριαία δεδομένα, οι δύο μεθοδολογίες παρουσιάζουν ακόμα μεγαλύτερη ταύτιση. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της πιο γραμμικής συμπεριφοράς, λόγω της μη εμφάνισης ρυθμού αύξησης που να υπερβαίνει την Clausius-Clapeyron σε ορισμένο θερμοκρασιακό εύρος όπως συμβαίνει με τις ωριαίες τιμές. Ιδιαίτερα για θερμοκρασίες από 4°C έως 25°C οι δύο μεθοδολογίες δίνουν έναν ρυθμό αύξησης κοντά στο 7%/°C.



Σχήμα 4.2.7: Σύγκριση των μεθοδολογιών *Quantile Regression* (διακεκομμένες γραμμές) και *Binning* (συνεχείς γραμμές) για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια της τρίωρης έντασης βροχόπτωσης με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία. Αριστερά σύγκριση του μοντέλου CC με την μέθοδο *Binning*, δεξιά σύγκριση του μοντέλου CC+ με την μέθοδο *Binning*. Δίνονται για σύγκριση: ο ρυθμός CC (7%/°C) (κόκκινες διακεκομμένες) και ο 2CC (14%/°C) (πράσινες διακεκομμένες).

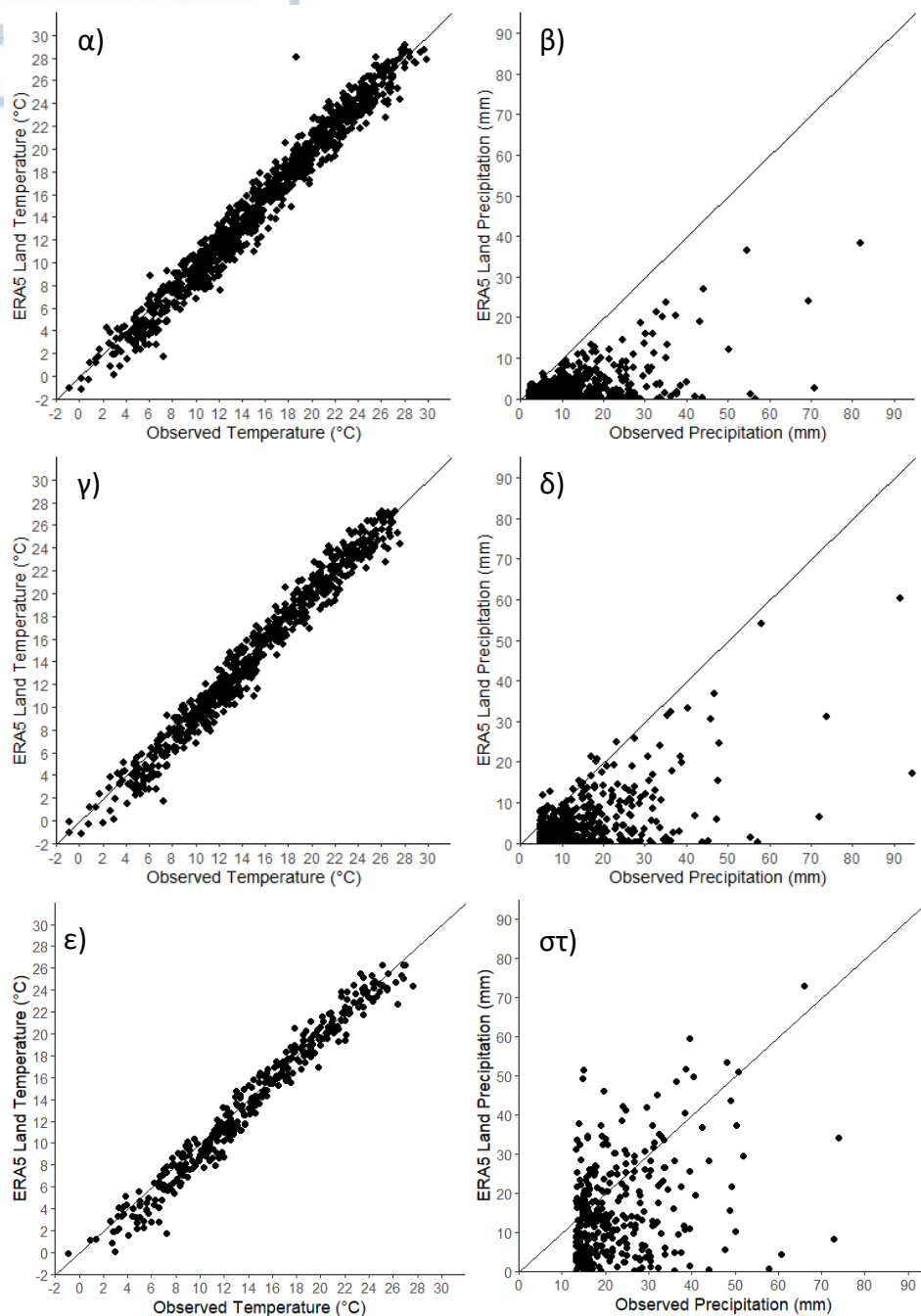
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΣΕ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η σχέση ακραίων βροχοπτώσεων-θερμοκρασίας για την Θεσσαλονίκη από δεδομένα reanalysis ERA5-Land καθώς και με την χρήση του περιοχικού μοντέλου ICTP-RegCM4-6 τόσο για την ιστορική όσο και για την μελλοντική περίοδο υπό το σενάριο μέγιστων εκπομπών RCP8.5.

5.1. ΔΕΔΟΜΕΝΑ REANALYSIS ERA5-LAND

Αναλύθηκαν οι παράμετροι της βροχόπτωσης, θερμοκρασίας και σημείου δρόσου από τα δεδομένα ERA5 Land στο πλησιέστερο grid point στον μετεωρολογικό σταθμό με στόχο την σύγκριση τους με τα πραγματικά και την αξιολόγηση των δεδομένων reanalysis στην καταγραφή των ακραίων.

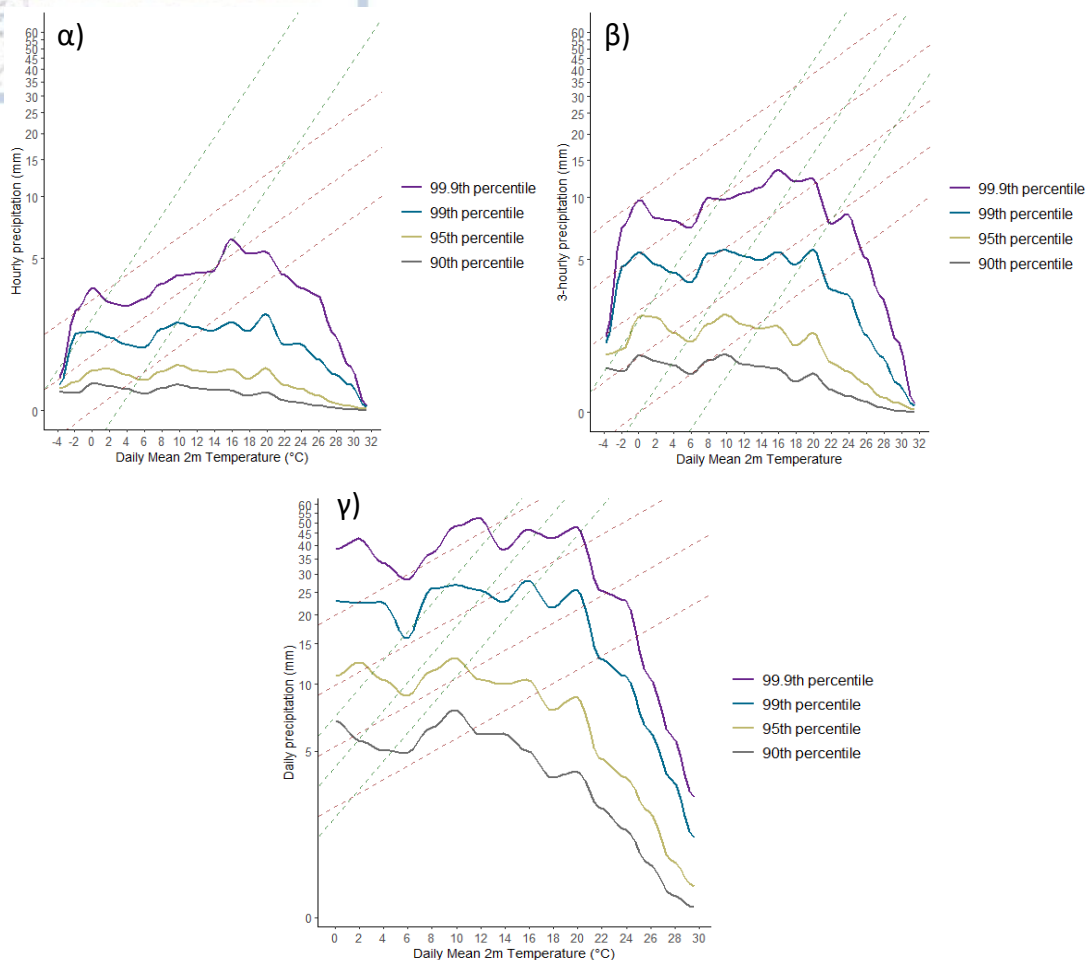
Πραγματοποιήθηκε σύγκριση των μέσων ημερήσιων θερμοκρασιών και των υψών βροχής για τις περιπτώσεις που υπερβαίνουν το 90° ποσοστημόριο βροχόπτωσης του σταθμού για τα ωριαία δεδομένα (Σχήμα 5.1.1-α,β), τα τρίωρα (Σχήμα 5.1.1-γ,δ) και τα ημερήσια δεδομένα (Σχήμα 5.1.1-ε,στ). Προκύπτει ότι υπάρχει σημαντική συμφωνία των δεδομένων reanalysis με τις παρατηρούμενες τιμές για τη μέση ημερήσια θερμοκρασία (Σχήμα 5.1.1-α,γ,ε). Αντίθετα, στην περίπτωση των βροχοπτώσεων (Σχήμα 5.1.1-β, δ και στ), τα ERA5 Land υποεκτιμούν σημαντικά τις ακραίες τιμές (>90° ποσοστημόριο). Συγκεκριμένα, 975 περιπτώσεις από τις συνολικά 980 βρίσκονται κάτω από την ευθεία $y=x$ το οποίο αντιστοιχεί σε 99,5% των περιπτώσεων. Για τα τρίωρα δεδομένα αντίστοιχα υποεκτιμούνται οι 666 από τις 691 περιπτώσεις (96,4%) ενώ για τις ημερήσιες τιμές το ποσοστό υποεκτίμησης είναι 72,4% (270 στις 373 περιπτώσεις).



Σχήμα 5.1.1: Σύγκριση δεδομένων ERA5 Land και παρατηρήσεων σταθμού για τις περιπτώσεις που υπερβαίνουν το 90^ο ποσοστημόριο του σταθμού. Για την παράμετρο της θερμοκρασίας, α) από ωριαία δεδομένα, γ) από τρίωρα δεδομένα και ε) ημερήσια δεδομένα. Για την παράμετρο της βροχόπτωσης β)ω-ριαία δεδομένα, δ) τρίωρα δεδομένα και στ) ημερήσια δεδομένα. Η ευθεία αντιστοιχεί στην $x=y$.

5.1.1. Εφαρμογή της μεθόδου binning στα δεδομένα Reanalysis

Η εφαρμογή της μεθόδου binning στα ωριαία, τριώρα και ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης από τα ERA5 Land (Σχήμα 5.1.2), καταδεικνύει την σαφή υποεκτίμηση των ακραίων τιμών. Τα ανώτερα ποσοστημόρια ακολουθούν αρνητική σχέση με τη θερμοκρασία μέχρι τους 6 °C και στην συνέχεια θετική μέχρι τους 10-12 °C και για τις τρεις χρονικές κλίμακες. Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες, το 90^ο και 95^ο ποσοστημόριο παρουσιάζουν συνεχώς αρνητική τάση, το 99^ο εμφανίζει μηδενική τάση έως τους 21 °C και στη συνέχεια πτώση και το 99,9^ο ακολουθεί αύξηση με ρυθμό ελαφρώς μικρότερο της CC μέχρι τους 21 °C και έπειτα η σχέση γίνεται αρνητική. Παρότι για ορισμένες θερμοκρασιακές κλάσεις εντοπίζονται σημαντικές αυξήσεις, αυτές δεν διατηρούνται. Προκύπτει ότι το «hook shape» που έχει παρατηρηθεί για τις μεσογειακές περιοχές είναι πιο διακριτό στα δεδομένα reanalysis από ότι στις παρατηρήσεις. Παρά την υποεκτίμηση στις ακραίες τιμές από τα ERA5, οι θερμοκρασίες που η σχέση γίνεται έντονα αρνητική είναι μεταξύ 21 και 24 °C και βρίσκεται σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις. Ωστόσο, αρνητική σχέση εντοπίζεται για το 90^ο και 95^ο ποσοστημόριο για θερμοκρασίες >9-10°C το οποίο είναι σε συμφωνία με προγενέστερες μελέτες που τοποθετούν το όριο στους 7 °C για την Ελληνική περιοχή (Drobinski et al., 2018).



Σχήμα 5.1.2: Σχέση βροχόπτωσης με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια των δεδομένων ERA5 Land βάσει της μεθόδου Binning, για α) ωριαία, β) τρίωρα και γ) ημερήσια δεδομένα. Δίνονται για σύγκριση: ο ρυθμός CC (7%/°C) (κόκκινες διακεκομμένες) και ο 2CC (14%/°C) (πράσινες διακεκομμένες).

5.2. ΠΕΡΙΟΧΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ICTP-RegCM4-6

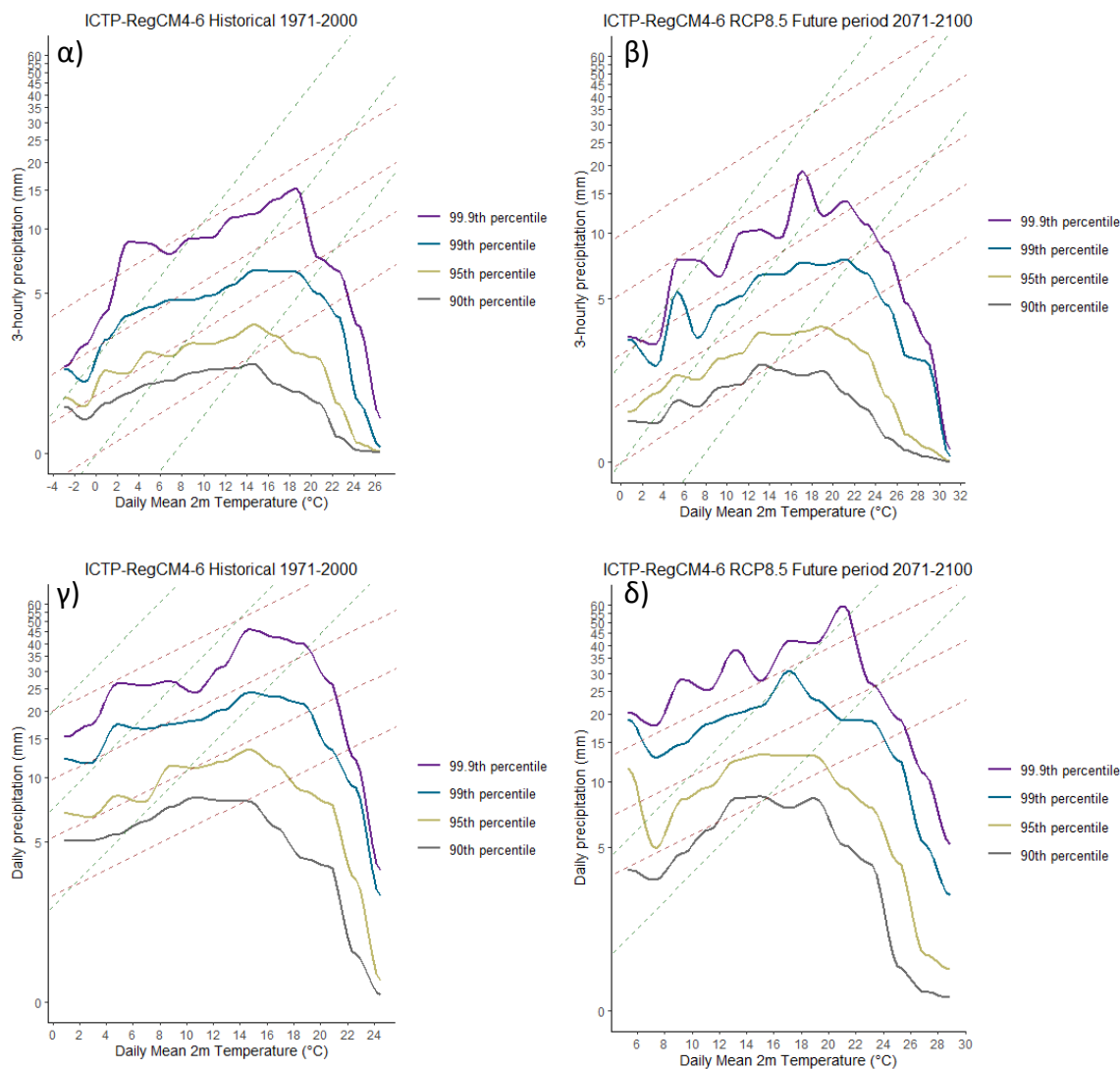
Χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του περιοχικού μοντέλου ICTP-RegCM4-6 για τις παραμέτρους της βροχόπτωσης, θερμοκρασίας και σημείου δρόσου στο πλησιέστερο grid point στη Θεσσαλονίκη. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για τρίωρες και ημερήσιες τιμές βροχόπτωσης, μέση ημερήσια θερμοκρασία και σημείου δρόσου. Αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα για την ιστορική περίοδο του μοντέλου όπου επιλέχθηκε η περίοδος 1971-2000 και για την μελλοντική περίοδο 2071-2100 υπό το σενάριο RCP8.5.

5.2.1. Εφαρμογή της μεθόδου binning στα δεδομένα

Πραγματοποιήθηκε εφαρμογή της μεθόδου binning τόσο στα ιστορικά όσο και στα μελλοντικά δεδομένα του μοντέλου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.2.1. Για την περίοδο 1971-2000 (Σχήμα 5.2.1-α) παρατηρείται αύξηση των ακραίων τιμών τριώρου μέχρι τους 15 °C για το 90°, 95° και 99° ποσοστημόριο και έως τους 19 °C για το 99,9°. Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες η σχέση γίνεται έντονα αρνητική. Τα ανώτερα ποσοστημόρια εμφανίζουν ρυθμό αύξησης μικρότερο από αυτόν που ορίζει η σχέση Clausius-Clapeyron (sub-CC). Μόνο το 99,9° ποσοστημόριο προσεγγίζει τον ρυθμό του 7%/°C. Για την μελλοντική περίοδο 2071-2100 με το σενάριο RCP8.5 (Σχήμα 5.2.1-β), προκύπτει ελαφρώς μεγαλύτερο scaling που είναι κοντά σε αυτό που ορίζει η CC (για το 90° και 95° ποσοστημόριο) ή και μεγαλύτερο (99° και 99,9°). Η σχέση γίνεται αρνητική σε θερμοκρασίες >18-19 °C (90°, 95°) και >21-22 °C (99°, 99,9°). Κατά συνέπεια, εκτός από την αναμενόμενη αύξηση του ρυθμού με τον οποίο οι ακραίες βροχοπτώσεις γίνονται εντονότερες με την θερμοκρασία, αναμένεται αύξηση του θερμοκρασιακού ορίου μέχρι το οποίο διατηρείται η σχέση. Συγκεκριμένα, εντοπίζεται μετατόπιση του θερμοκρασιακού αυτού ορίου σε υψηλότερες τιμές κατά 2 έως 4 °C. Η μετακίνηση αυτή αντιστοιχεί με την αναμενόμενη αύξηση στη μέση ημερήσια θερμοκρασία κατά την μελλοντική περίοδο εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής.

Αντίστοιχα είναι τα αποτελέσματα και για τις ημερήσιες ακραίες τιμές. Κατά την περίοδο 1971-2000 (Σχήμα 5.2.1-γ) τα ανώτερα ποσοστημόρια της ημερήσιας βροχόπτωσης αυξάνονται με την θερμοκρασία με ρυθμό κοντά στο 7%/°C (ιδιαίτερα το 90° και 95° ποσοστημόριο) μέχρι τους 15°C. Στην συνέχεια ακολουθούν αρνητική σχέση (>15°C) η οποία γίνεται έντονα αρνητική για μέση ημερήσια θερμοκρασία >20°C. Για την μελλοντική περίοδο (Σχήμα 5.2.1-δ), όπως και στην περίπτωση των τριώρων δεδομένων, τα ημερήσια δεδομένα εμφανίζουν μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης με τη θερμοκρασία. Για θερμοκρασίες μεταξύ 8 και 14°C οι ακραίες βροχοπτώσεις αυξάνονται με ρυθμό κοντά σε αυτόν που ορίζει η CC για το 99° και 99,9° ποσοστημόριο. Η αύξηση είναι ακόμα μεγαλύτερη για το 90° και 95° ποσοστημόριο η οποία υπερβαίνει τον ρυθμό CC και φτάνει και το

14%/°C (2CC). Η σχέση γίνεται αρνητική για θερμοκρασίες >18-20°C. Και στην περίπτωση των ημερήσιων τιμών το θερμοκρασιακό όριο πάνω από το οποίο η σχέση βροχόπτωσης-θερμοκρασίας γίνεται αρνητική φαίνεται να μετατοπίζεται σε υψηλότερες κατά 3-5°C θερμοκρασίες.

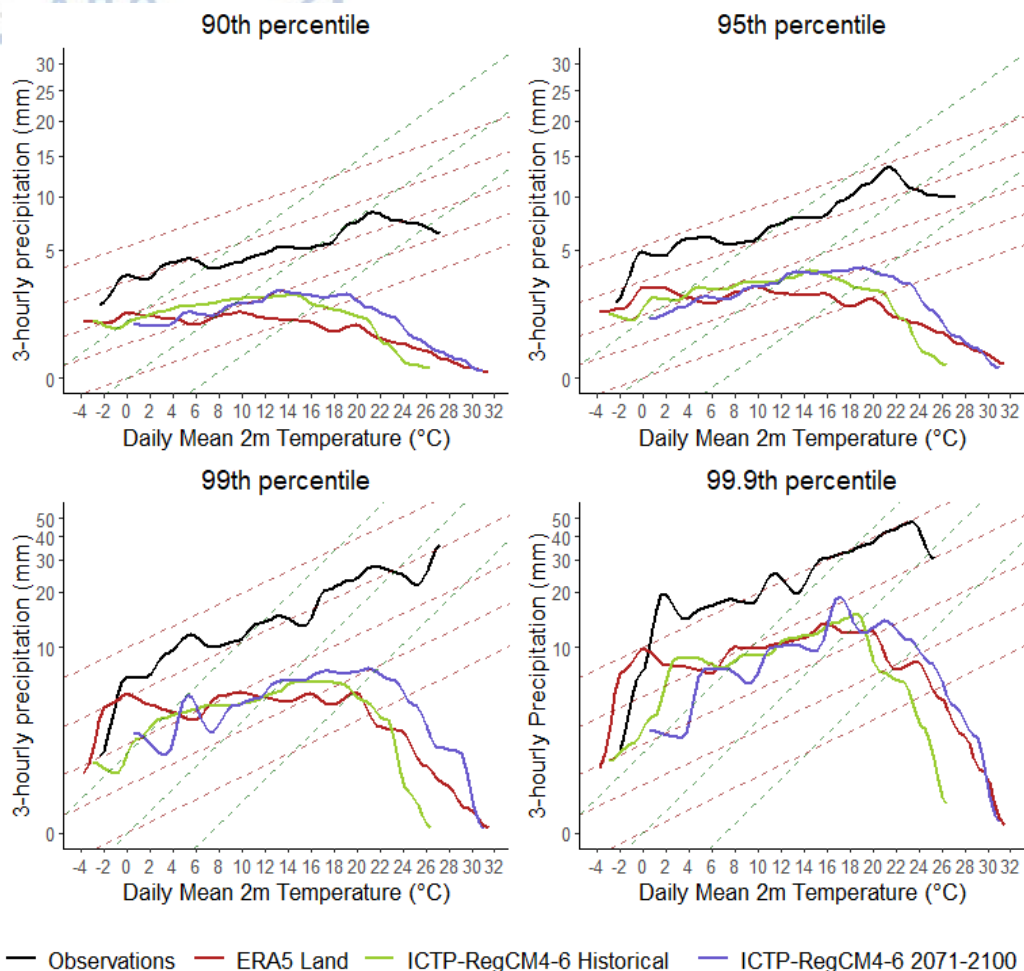


Σχήμα 5.2.1: Σχέση βροχόπτωσης με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια των δεδομένων του μοντέλου ICTP-RegCM4-6 βάσει της μεθόδου Binning, για τρίωρα δεδομένα α) κατά την ιστορική περίοδο 1971-2000 και β) κατά την μελλοντική περίοδο 2071-2100, για ημερήσια δεδομένα γ) κατά την ιστορική και δ) κατά την μελλοντική περίοδο. Δίνονται για σύγκριση: ο ρυθμός CC (7%/°C) (κόκκινες διακεκομμένες) και ο 2CC (14%/°C) (πράσινες διακεκομμένες).

5.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΟΥΜΕΝΩΝ ΣΧΕ- ΣΕΩΝ

Στο Σχήμα 5.3.1 παρατίθενται τα αποτελέσματα της μεθόδου binning για τα πραγματικά δεδομένα, τα δεδομένα reanalysis και τα προσομοιωμένα από το μοντέλο, για την ιστορική και μελλοντική περίοδο, για κάθε ένα από τα τέσσερα επιλεγμένα ποσοστημόρια τρίωρης βροχόπτωσης ξεχωριστά. Παρατηρείται η απόκλιση των ERA5 Land και του μοντέλου από τα πραγματικά δεδομένα καθώς αμφότερα υποεκτιμούν τις ακραίες τιμές βροχόπτωσης. Η υποεκτίμηση αυτή οφείλεται πιθανότατα στο dry bias που παρουσιάζουν τα μοντέλα και έχει παρατηρηθεί και στα δεδομένα reanalysis (Gomis-Cebolla et al., 2023; Lavers et al., 2022). Για τις τρίωρες τιμές, από τις καμπύλες των δεδομένων του σταθμού διακρίνεται ότι η βροχόπτωση ακολουθεί scaling με τη θερμοκρασία κοντά στο ρυθμό που ορίζει η CC (7%/°C), ο οποίος στο 90^ο και 95^ο γίνεται για ορισμένες θερμοκρασίες super-CC και μάλιστα 2CC. Τα δεδομένα του μοντέλου ακολουθούν ένα scaling κοντά στο CC ενώ στα δεδομένα reanalysis ERA5 Land ο ρυθμός είναι κοντά στον CC για το 99ο και 99.9ο ενώ στο 90ο και 95ο percentile το scaling είναι sub-CC και αρνητικό.

Επιπλέον γίνεται φανερό ότι το hook shape που εμφανίζεται στα δεδομένα reanalysis και στα δεδομένα του μοντέλου και αναφέρεται και στην βιβλιογραφία δεν είναι τόσο διακριτό στα πραγματικά δεδομένα, συγκεκριμένα η απότομη πτώση της καμπύλης εμφανίζεται μόνο στο 90ο και 95ο percentile. Σημειώνεται βέβαια ότι για την κατασκευή των καμπυλών στη μεθοδολογία επιλέγεται ο ελάχιστος αριθμός 50 περιπτώσεων ανά bin με σκοπό την ακριβέστερη αναπαράσταση των δεδομένων. Χωρίς τον περιορισμό αυτό η καμπύλη των πραγματικών δεδομένων εμφανίζει χαρακτηριστική απότομη πτώση σε θερμοκρασίες >30°C, ωστόσο εξαιρείται από τα διαγράμματα λόγω του μικρού αριθμού περιπτώσεων στα ανώτερα bin (λιγότερες από 10 περιπτώσεις). Ανεξάρτητα ωστόσο από τον περιορισμό ή όχι των περιπτώσεων, είναι χαρακτηριστικό ότι το scaling στα πραγματικά δεδομένα διατηρείται σε πολύ μεγαλύτερες θερμοκρασίες από αυτές που δίνουν τα δεδομένα reanalysis και το μοντέλο. Το θερμοκρασιακό όριο από το οποίο η σχέση γίνεται αρνητική διαφέρει για κάθε percentile.

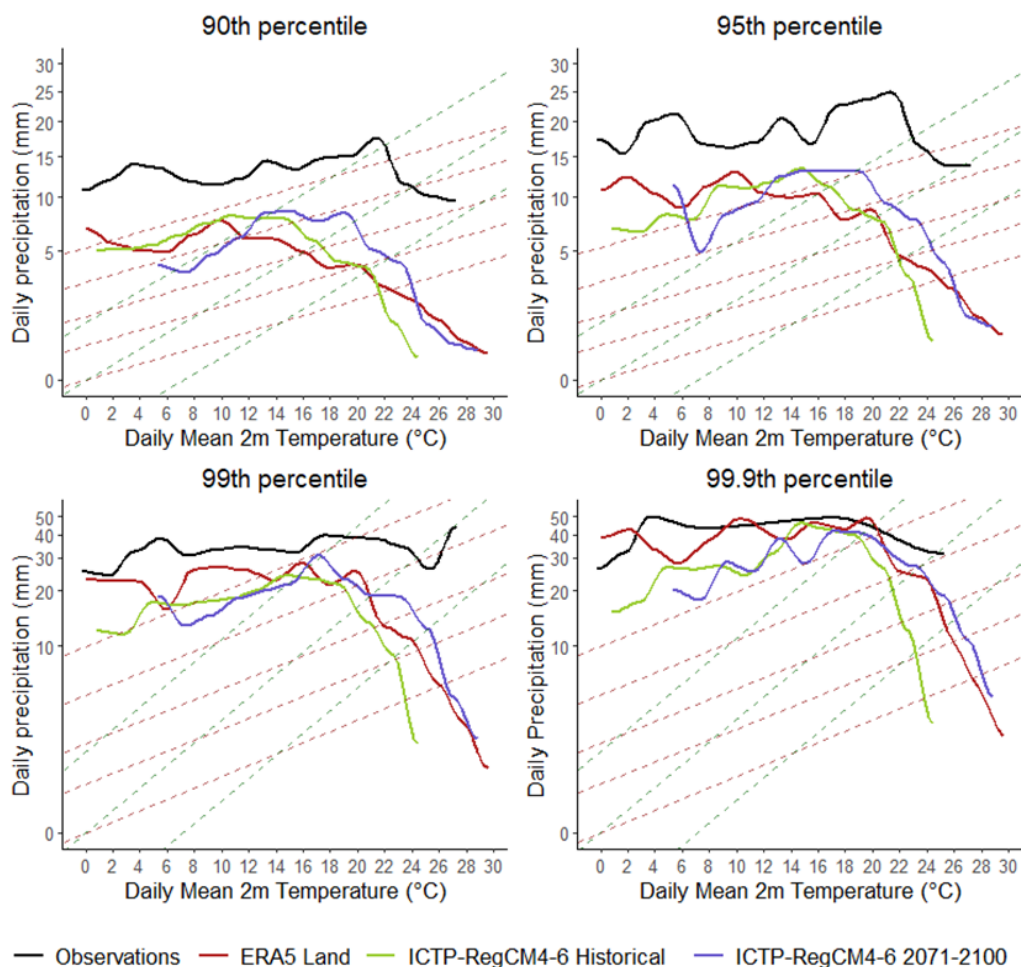


Σχήμα 5.3.1: Σύγκριση των σχέσεων βροχόπτωσης-μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας από την εφαρμογή της μεθόδου Binning για τα τρίωρα δεδομένα μεταξύ παρατηρήσεων (μαύρο), ERA5 Land (κόκκινο), ιστορικής περιόδου του μοντέλου RegCM4-6 (πράσινο) και μελλοντικής περιόδου του μοντέλου RegCM4-6 (μπλε) για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια (90°, 95°, 99° και 99,9°). Δίνονται για σύγκριση: ο ρυθμός CC (7%/°C) (κόκκινες διακεκομμένες) και ο 2CC (14%/°C) (πράσινες διακεκομμένες).

Μικρότερες αλλά εξίσου διακριτές είναι οι διαφορές μεταξύ παρατηρήσεων και προσομοιώσεων στις ημερήσιες ακραίες τιμές (Σχήμα 5.3.2). Η υποεκτίμηση των δεδομένων για το 95° και 99° ποσοστημόριο βροχόπτωσης των ημερήσιων τιμών είναι μικρότερη. Εν αντιθέσει με τις τρίωρες τιμές, στις ημερήσιες το hook shape είναι περισσότερο διακριτό.

Η απότομη αρνητική σχέση στις υψηλότερες θερμοκρασίες είναι πολύ εμφανής για το 90° και 95° ποσοστημόριο των παρατηρήσεων, ωστόσο και σε αυτήν την περίπτωση το θερμοκρασιακό όριο είναι μεγαλύτερο από ότι στα δεδομένα reanalysis αλλά και στο

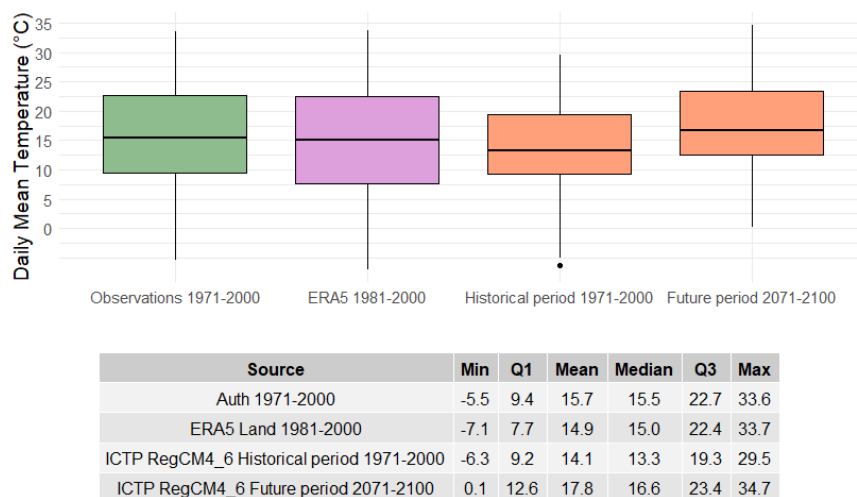
μοντέλο. Για το 99^ο ποσοστημόριο δεν εμφανίζεται αρνητικό scaling στις υψηλές θερμοκρασίες ενώ για το 99,9^ο τα δεδομένα reanalysis και τα δεδομένα του μοντέλου δεν απέχουν σημαντικά από τις παρατηρήσεις.



Σχήμα 5.3.2: Σύγκριση των σχέσεων βροχόπτωσης-μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας από την εφαρμογή της μεθόδου Binning για τα ημερήσια δεδομένα μεταξύ παρατηρήσεων (μαύρο), ERA5 Land (κόκκινο), ιστορικής περιόδου του μοντέλου RegCM4-6 (πράσινο) και μελλοντικής περιόδου του μοντέλου RegCM4-6 (μπλε) για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια (90^ο, 95^ο, 99^ο και 99,9^ο). Δίνονται για σύγκριση: ο ρυθμός CC (7%/°C) (κόκκινες διακεκομμένες) και ο 2CC (14%/°C) (πράσινες διακεκομμένες).

Χαρακτηριστική είναι επίσης η διαφορά του θερμοκρασιακού ορίου μεταξύ ιστορικής και μελλοντικής περιόδου του μοντέλου. Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 5.2.1, συγκρίνοντας τις δύο καμπύλες του μοντέλου παρατηρείται ότι στη μελλοντική περίοδο το θερμοκρασιακό όριο είναι μεγαλύτερο και ότι οι δύο καμπύλες κινούνται παράλληλα

μετά από αυτό. Το γεγονός αυτό αποτελεί απόδειξη ότι στο μελλοντικό θερμότερο κλίμα, όπου η σχετική υγρασία παραμένει σχετικά σταθερή και η διαθεσιμότητα υδρατμών αναμένεται ως εκ τούτου να αυξηθεί βάσει του νόμου Clausius-Clapeyron, η σχέση CC διατηρείται σε μεγαλύτερη θερμοκρασία. Μάλιστα σύμφωνα με τους (Drobinski et al., 2018) η θερμοκρασιακή διαφορά των δύο σημείων καμπής αναμένεται να είναι αντίστοιχη της αναμενόμενης αύξησης της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας λόγω κλιματικής αλλαγής. Πράγματι, από τα διαγράμματα των Σχημάτων 5.3.1 και 5.3.2 η διαφορά των δύο σημείων καμπής κυμαίνεται μεταξύ 3-4°C και σύμφωνα με το Σχήμα 5.3.3 η διαφορά στη μέση ημερήσια θερμοκρασία από το μοντέλο ICTP RegCM4-6 μεταξύ της ιστορικής (1971-2000) και την μελλοντικής περιόδου (2071-2100) είναι περίπου 3,3°C. Παράλληλα, από το Σχήμα 5.3.3 προκύπτει ότι η μέση ημερήσια θερμοκρασία στον μετεωρολογικό σταθμό του ΑΠΘ για την περίοδο 1971-2000 ήταν 15,7°C. Από τα δεδομένα reanalysis ERA5 Land για την περίοδο 1981-2000 η μέση τιμή της θερμοκρασίας είναι 14,9°C και το εύρος πολύ κοντά σε αυτό του σταθμού. Αντιθέτως, από το μοντέλο ICTP-RegCM4-6 η μέση θερμοκρασία για την περίοδο 1971-2000 είναι κατά 1,6°C μικρότερη από την πραγματική και το εύρος μικρότερο.



Σχήμα 5.3.3: Θηκογράμματα της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας από τις παρατηρήσεις του σταθμού για την περίοδο 1971-2000, τα ERA5 Land για την περίοδο 1981-2000, το μοντέλο ICTP-RegCM4-6 για την ιστορική περίοδο 1971-2000 και την μελλοντική 2071-2100 με το σενάριο RCP8.5. Δίνεται ο πίνακας με τα στατιστικά μέτρα για τις τέσσερις χρονοσειρές (ελάχιστο, 1^ο τεταρτημόριο, μέσος όρος, διάμεσος, 3^ο τεταρτημόριο, μέγιστο).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΧΕ- ΣΕΩΝ ΣΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ REANALYSIS ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό, επιχειρείται η βελτίωση των δεδομένων ERA5 Land και του περιοχικού μοντέλου ICTP-RegCM4-6 με βάση τις σχέσεις που υπολογίστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Βασική αρχή για την διόρθωση των προσομοιώσεων αυτών με την χρήση των παρατηρούμενων σχέσεων, είναι ότι η σχέση ακραίων βροχοπτώσεων – θερμοκρασίας παραμένει σταθερή στο χρόνο υπό την μοναδική προϋπόθεση της ύπαρξης διαθεσιμότητας υγρασίας.

6.1. ΔΕΔΟΜΕΝΑ REANALYSIS

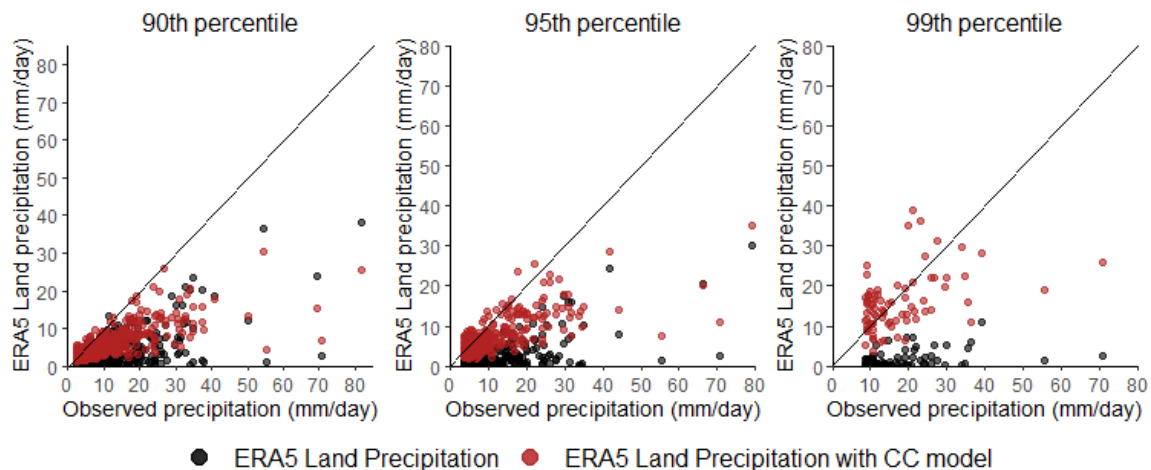
Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου 5, τα δεδομένα reanalysis ERA5 Land παρουσιάζουν σημαντική υποεκτίμηση των ακραίων τιμών βροχόπτωσης για τη Θεσσαλονίκη. Για τον λόγο αυτό, εφαρμόστηκαν οι σχέσεις ακραίων βροχοπτώσεων – θερμοκρασίας, που υπολογίστηκαν στο Κεφάλαιο 4, στα δεδομένα reanalysis κατά τις ημέρες που εκδηλώθηκαν ακραία επεισόδια με σκοπό την διόρθωση των τιμών βροχόπτωσης των ERA5 Land. Συγκεκριμένα, για τις ημέρες που έχουν καταγραφεί έντονες βροχοπτώσεις εφαρμόστηκαν οι σχέσεις στα δεδομένα ημερήσιας θερμοκρασίας από τα ERA5 Land προκειμένου να υπολογιστεί η αναμενόμενη ακραία βροχόπτωση για κάθε ένα από τα ανώτερα ποσοστημόρια.

6.1.1. Ωριαία δεδομένα

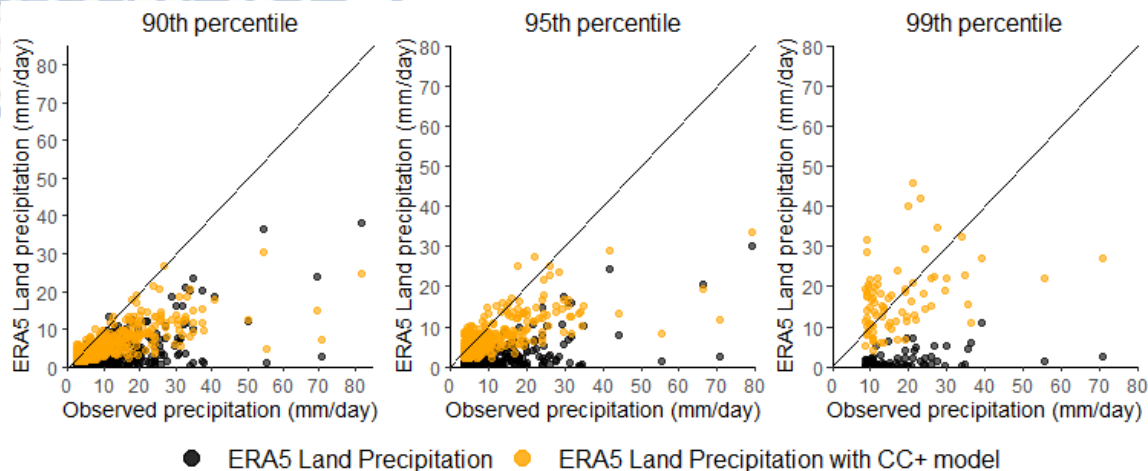
Στο Σχήμα 6.1.1 παρουσιάζονται οι ωριαίες τιμές βροχόπτωσης, αθροισμένες στο 24ωρο, από τα δεδομένα reanalysis σε σχέση με τις παρατηρήσεις του σταθμού (με μαύρο χρώμα) καθώς και οι τιμές που υπολογίστηκαν μέσω της μεθόδου Quantile regression (κόκκινο χρώμα) χρησιμοποιώντας το μοντέλο CC. Οι ωριαίες τιμές αθροίζονται στο 24ωρο προκειμένου να ληφθούν υπόψιν τυχόν χρονικές αποκλίσεις στην καταγραφή τους από τα ERA5. Παρατηρείται σαφής μείωση της υποεκτίμησης των δεδομένων

reanalysis. Συγκεκριμένα, για το 90^ο ποσοστημόριο, η υποεκτίμηση παρουσιάζει μείωση από 98,8% σε 87,2%, για το 95^ο από 100% σε 78,4% και για το 99^ο από 100% σε 51,9%.

Αντιστοίχως, στο Σχήμα 6.1.2 δίνονται οι τιμές που υπολογίστηκαν με το μοντέλο CC+ (το μοντέλο που καθορίζει ένα θερμοκρασιακό σημείο πάνω από το οποίο η σχέση μεταβάλλεται). Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με την υποεκτίμηση να μειώνεται σε 85,8%, 78,4% και 51,9% για τα αντίστοιχα τρία ποσοστημόρια των περιπτώσεων. Η υποεκτίμηση των ακραίων από τα ERA5 Land μειώνεται συνεπώς κατά 13% (11,6% με το μοντέλο CC) για τα επεισόδια που ανήκουν στο 90^ο ποσοστημόριο, κατά 21,6% για το 95^ο και κατά 48,1% για το 99^ο. Η πλειοψηφία των περιπτώσεων εξακολουθεί να υποεκτιμάται, εντούτοις όλες οι περιπτώσεις εμφανίζουν αυξημένη ένταση συγκριτικά με τις πρωταρχικές τιμές των δεδομένων reanalysis και είναι συνεπώς πιο κοντά στις παρατηρήσεις. Σημειώνεται, ότι στόχος δεν είναι η απόλυτη διόρθωση των δεδομένων αυτών αλλά η δυνατότητα να υπάρχει μια καλύτερη απεικόνιση και καταγραφή των ακραίων τιμών τις οποίες τα ERA5 Land αδυνατούν να εντοπίσουν σε μέγεθος.

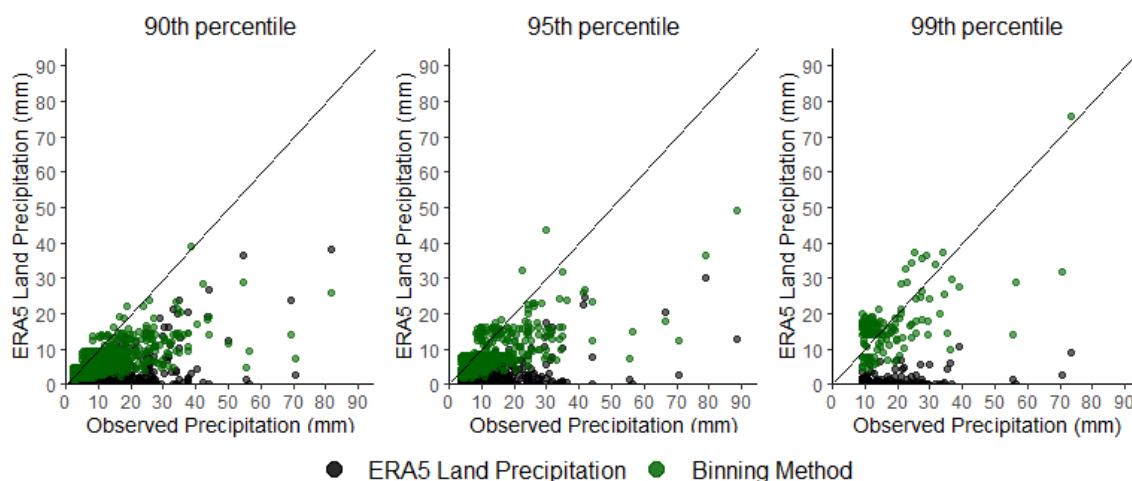


Σχήμα 6.1.1: Διαγράμματα διασποράς των ανώτερων ποσοστημορίων (90^ο, 95^ο και 99^ο) των ωριαίων τιμών βροχόπτωσης, αθροισμένων στο 24ωρο μεταξύ ERA5 Land και παρατηρήσεων σταθμού (μαύρο) και μεταξύ ERA5 Land επανυπολογισμένων με το μοντέλο CC της μεθόδου Quantile regression (κόκκινο). Η ευθεία αντιστοιχεί στην $x=y$.



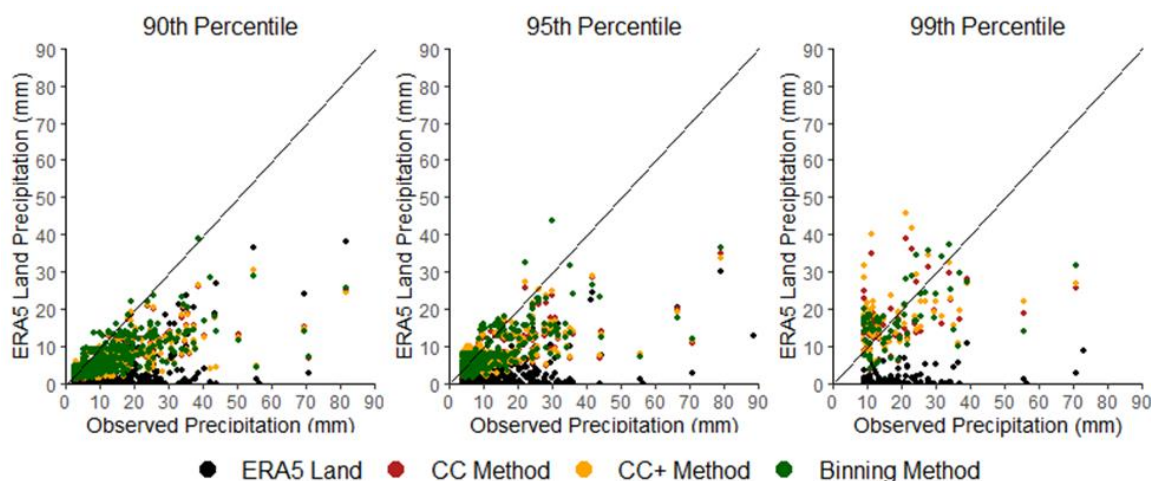
Σχήμα 6.1.2: Διαγράμματα διασποράς των ανώτερων ποσοστημορίων (90^ο, 95^ο και 99^ο) των ωριαίων τιμών βροχόπτωσης, αθροισμένων στο 24ωρο μεταξύ ERA5 Land και παρατηρήσεων σταθμού (μαύρο) και μεταξύ ERA5 Land επανυπολογισμένων με το μοντέλο CC+ της μεθόδου Quantile regression (κίτρινο). Η ευθεία αντιστοιχεί στην $x=y$.

Αντίστοιχα υπολογίστηκαν οι τιμές με τις σχέσεις της μεθόδου binning (Σχήμα 6.1.3). Για το 90ο ποσοστημόριο, με τις τιμές των ERA5 υπολογισμένες μέσω της μεθόδου binning, η υποεκτίμηση μειώνεται από το 99,5% σε 78,2%, για το 95ο από 100% σε 70,3% και για το 99ο από 100% σε 47,3%. Επομένως, υπάρχει μείωση της υποεκτίμησης των ακραίων κατά 21,3% για το 90ο ποσοστημόριο, κατά 29,7% για το 95ο και κατά 52,7% για το 99ο.



Σχήμα 6.1.3: Διαγράμματα διασποράς των ανώτερων ποσοστημορίων (90^ο, 95^ο και 99^ο) των ωριαίων τιμών βροχόπτωσης, αθροισμένων στο 24ωρο μεταξύ ERA5 Land και παρατηρήσεων σταθμού (μαύρο) και μεταξύ ERA5 Land επανυπολογισμένων με την μέθοδο Binning (πράσινο). Η ευθεία αντιστοιχεί στην $x=y$.

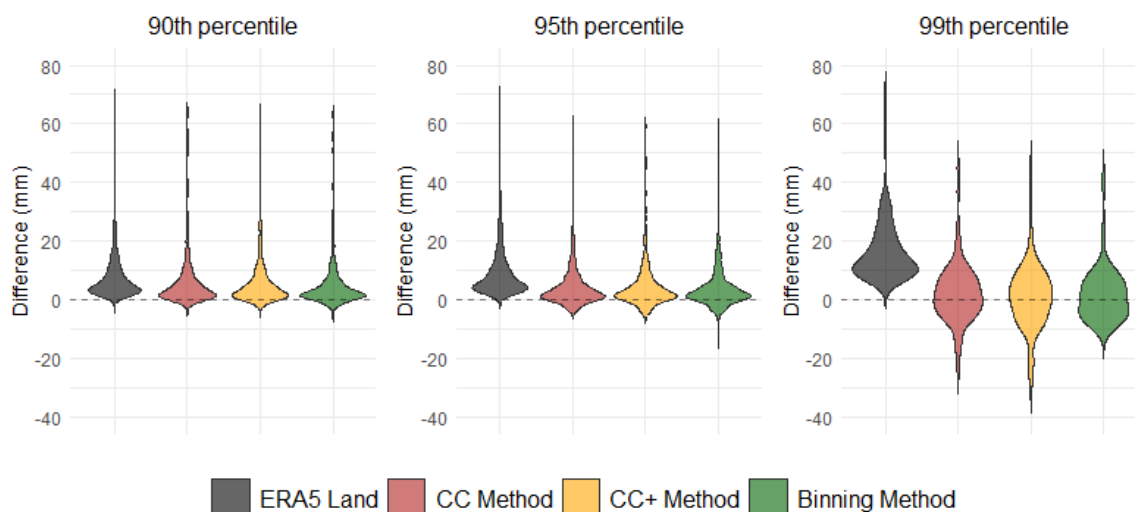
Στο Σχήμα 6.1.4 παρατίθενται οι παραπάνω τιμές των ανώτερων ποσοστημορίων της ωριαίας βροχόπτωσης από τις παρατηρήσεις συγκριτικά με τα πρωταρχικά δεδομένα από τα ERA5 Land (μαύρο χρώμα) και με τις υπολογισμένες τιμές μέσω των δύο μεθοδολογιών στο ίδιο διάγραμμα. Για την μέθοδο quantile regression με κόκκινο για το μοντέλο QQ και με κίτρινο για το μοντέλο QQ+ και για την μέθοδο binning με πράσινο.



Σχήμα 6.1.4: Διαγράμματα διασποράς των ανώτερων ποσοστημορίων (90^ο, 95^ο και 99^ο) των ωριαίων τιμών βροχόπτωσης, αθροισμένων στο 24ωρο μεταξύ ERA5 Land και παρατηρήσεων σταθμού (μαύρο) και μεταξύ ERA5 Land επανυπολογισμένων με το μοντέλο CC (κόκκινο) και CC+ (κίτρινο) της μεθόδου Quantile regression και με την μέθοδο Binning (πράσινο). Η ευθεία αντιστοιχεί στην $x=y$.

Για την καλύτερη σύγκριση των μεθόδων, δημιουργήθηκαν τα violin plots των διαφορών των παρατηρήσεων του σταθμού από τα ERA5 και από τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων (Σχήμα 6.1.5). Διακρίνεται ότι η πλειοψηφία των τιμών των διαφορών είναι θετική για τα ERA5 Land, καταδεικνύοντας την σημαντική υποεκτίμηση. Με τον επανυπολογισμό των τιμών μέσω των σχέσεων που προέκυψαν από τις δύο μεθοδολογίες είναι εμφανές ότι οι διαφορές μειώνονται σημαντικά. Πιο συγκεκριμένα, για το 90^ο ποσοστημόριο η μέση τιμή της διαφοράς μεταξύ σταθμού και ERA5 Land είναι 7,7 mm και μειώνεται σε 5,3 mm με τις δύο μεθόδους quantile regression και σε 4,6 mm με τη μέθοδο Binning. Για το 95^ο η μείωση είναι από 9,1 mm σε 4,5mm με το μοντέλο CC, 4,3 mm με το μοντέλο CC+ και 3,8 mm με τη μέθοδο Binning. Για το 99^ο ποσοστημόριο η διαφορά μειώνεται αντίστοιχα από 16,6 mm σε 2,3 mm (CC), 1,1 mm (CC+) και 1,9 mm (Binning). Συνολικά, παρότι η εφαρμογή και των τριών σχέσεων οδηγεί σε σημαντική βελτίωση, η

μέγιστη μείωση της διαφοράς επιτυγχάνεται με την εφαρμογή των σχέσεων της μεθόδου Binning στα δεδομένα ημερήσιας θερμοκρασίας των ERA5 Land.

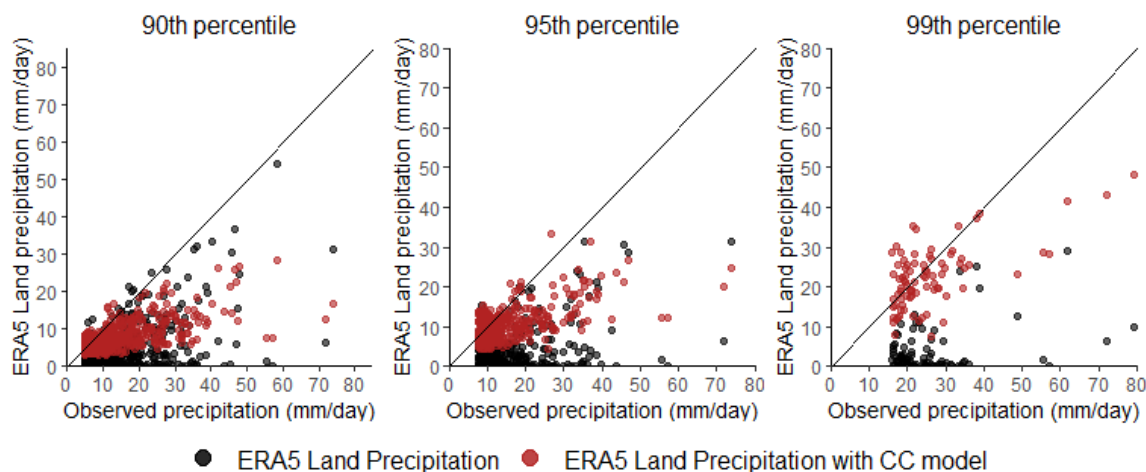


Σχήμα 6.1.5: Violin plots των διαφορών των παρατηρήσεων του σταθμού από τα αρχικά ERA5 Land (μαύρο) και τα ERA5 Land επανυπολογισμένα με το μοντέλο CC (κόκκινο), CC+ (κίτρινο) και την μέθοδο Binning (πράσινο) για το 90^ο, 95^ο και 99^ο ποσοστημόριο των ωριαίων τιμών βροχόπτωσης αθροισμένων στο 24ωρο.

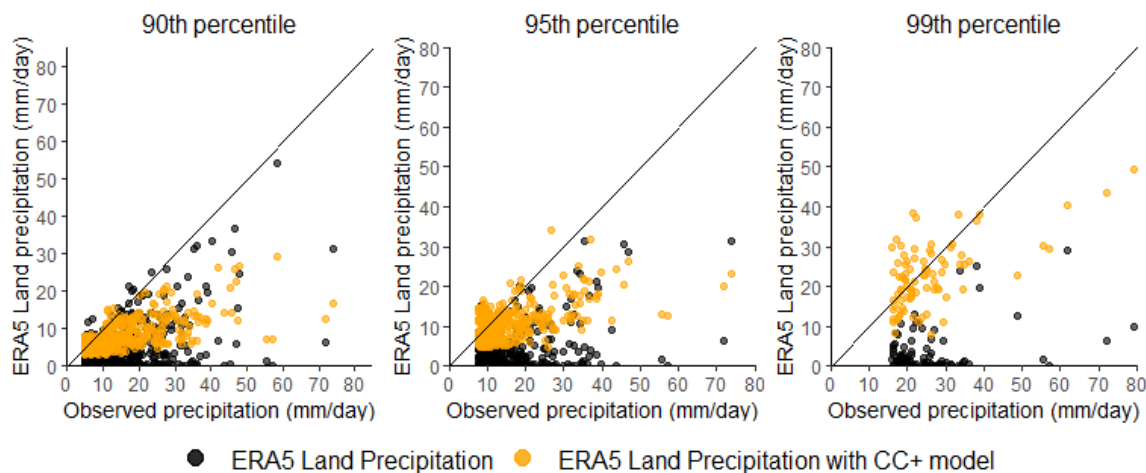
6.1.2. Τρίωρα δεδομένα

Στο Σχήμα 6.1.6 παρουσιάζονται οι τρίωρες ακραίες τιμές βροχόπτωσης, αθροισμένες στο 24ωρο με βάση το μοντέλο CC, ομοίως με τις ωριαίες τιμές. Παρατηρείται σημαντική μείωση της υποεκτίμησης των δεδομένων reanalysis. Πιο συγκεκριμένα, για το 90ο ποσοστημόριο, η υποεκτίμηση μειώνεται από 96,5% σε 85,9%, για το 95ο από 99,2% σε 77,8% και για το 99ο από 100% σε 66,3%. Στο Σχήμα 6.1.7 δίνονται οι αντίστοιχες τιμές που υπολογίστηκαν με το μοντέλο CC+. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με την υποεκτίμηση να μειώνεται σε 85,8%, 77,3% και 65% για τα αντίστοιχα τρία ποσοστημόρια των περιπτώσεων. Κατά συνέπεια, η υποεκτίμηση μειώνεται κατά 10,6% για τα επεισόδια που ανήκουν στο 90^ο ποσοστημόριο. Για το 95^ο μειώνεται κατά 21,4% (CC) και 21,9% (CC+) και για το 99^ο κατά 33,7% (CC) και 35% (CC+). Και σε αυτήν την περίπτωση η πλειοψηφία των περιπτώσεων εξακολουθεί να υποεκτιμάται, αλλά όλες οι τιμές εμφανίζουν αυξημένη ένταση συγκριτικά με τις πρωταρχικές τιμές των δεδομένων reanalysis. Η

βελτίωση είναι όμοια για τις τρίωρες τιμές συγκριτικά με τα ωριαία δεδομένα για το 90° και 95° αλλά μικρότερη για το 99°.



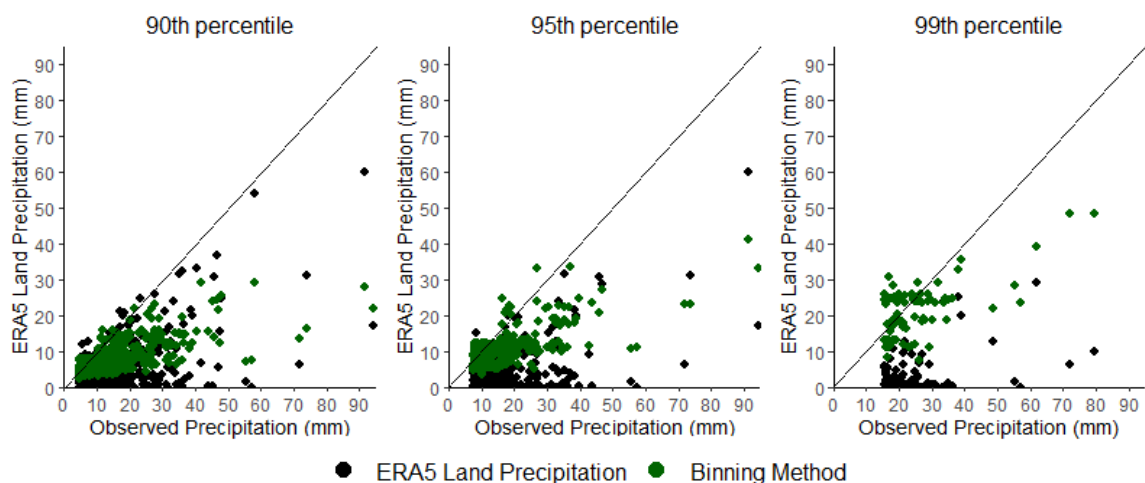
Σχήμα 6.1.6: Διαγράμματα διασποράς των ανώτερων ποσοστημορίων (90°, 95° και 99°) των τρίωρων τιμών βροχόπτωσης, αθροισμένων στο 24ωρο μεταξύ ERA5 Land και παρατηρήσεων σταθμού (μαύρο) και μεταξύ ERA5 Land επανυπολογισμένων με το μοντέλο CC της μεθόδου Quantile regression (κόκκινο). Η ευθεία αντιστοιχεί στην $x=y$.



Σχήμα 6.1.7: Διαγράμματα διασποράς των ανώτερων ποσοστημορίων (90°, 95° και 99°) των τρίωρων τιμών βροχόπτωσης, αθροισμένων στο 24ωρο μεταξύ ERA5 Land και παρατηρήσεων σταθμού (μαύρο) και μεταξύ ERA5 Land επανυπολογισμένων με το μοντέλο CC+ της μεθόδου Quantile regression (κίτρινο). Η ευθεία αντιστοιχεί στην $x=y$.

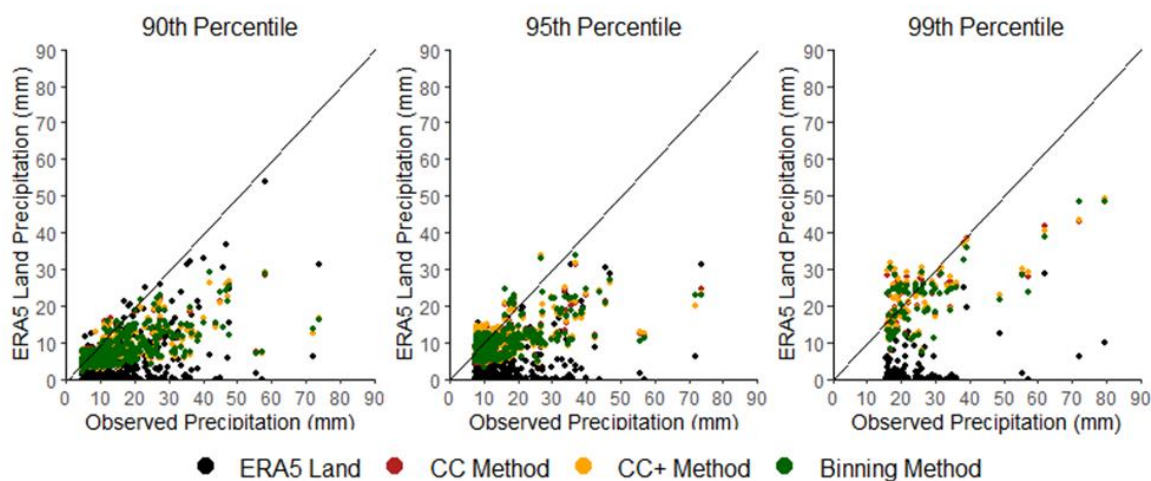
Όσον αφορά τις τιμές από την εφαρμογή της μεθόδου binning (Σχήμα 6.1.8). Για το 90ο ποσοστημόριο, η υποεκτίμηση μειώνεται από το 96,4% σε 87,3%, για το 95ο από 99,2% σε 76,2% και για το 99ο από 100% σε 68,7%. Επομένως, υπάρχει μείωση της

υποεκτίμησης των ακραίων κατά 9,1% για το 90ο ποσοστημόριο, κατά 23% για το 95ο και κατά 31,3% για το 99ο.



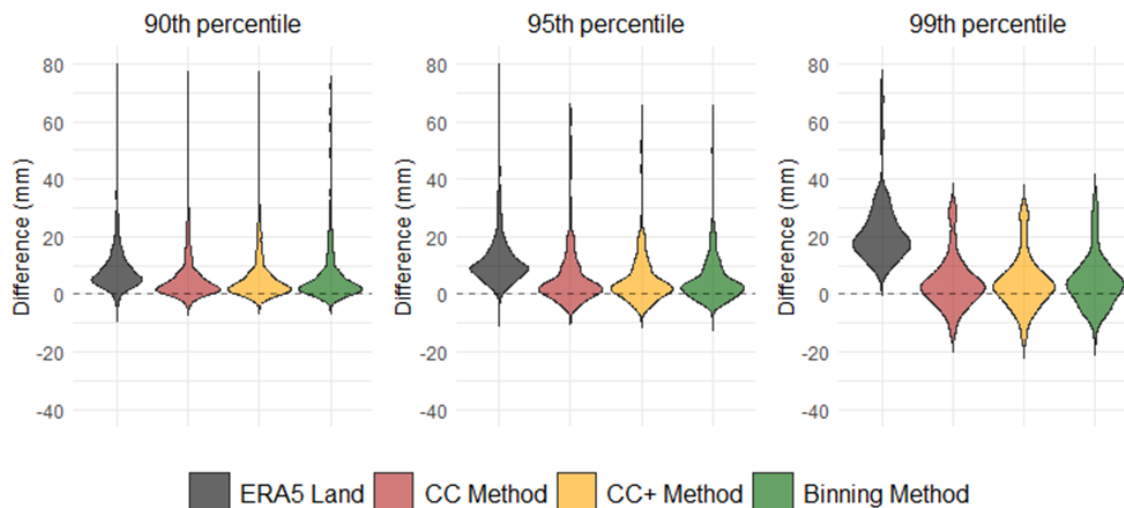
Σχήμα 6.1.8: Διαγράμματα διασποράς των ανώτερων ποσοστημορίων (90^ο, 95^ο και 99^ο) των τριών τιμών βροχόπτωσης, αθροισμένων στο 24ωρο μεταξύ ERA5 Land και παρατηρήσεων σταθμού (μαύρο) και μεταξύ ERA5 Land επανυπολογισμένων με τη μέθοδο Binning (πράσινο). Η ευθεία αντιστοιχεί στην $x=y$.

Στο Σχήμα 6.1.9 παρατίθενται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των τριών μεθόδων ταυτόχρονα. Και οι τρεις έχουν παρόμοια αποτελέσματα και οδηγούν σε σημαντική διόρθωση των αρχικών δεδομένων reanalysis.



Σχήμα 6.1.9: Διαγράμματα διασποράς των ανώτερων ποσοστημορίων (90^ο, 95^ο και 99^ο) των τριών τιμών βροχόπτωσης, αθροισμένων στο 24ωρο μεταξύ ERA5 Land και παρατηρήσεων σταθμού (μαύρο) και μεταξύ ERA5 Land επανυπολογισμένων με το μοντέλο CC (κόκκινο) και CC+ (κίτρινο) της μεθόδου Quantile regression και με την μέθοδο Binning (πράσινο). Η ευθεία αντιστοιχεί στην $x=y$.

Τα αντίστοιχα violin plots των διαφορών των παρατηρήσεων του σταθμού από τα ERA5 και από τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων δίνονται στο Σχήμα 6.1.10. Διακρίνεται ότι η πλειοψηφία των τιμών των διαφορών είναι θετική για τα ERA5 Land, καταδεικνύοντας την σημαντική υποεκτίμηση. Με τον επανυπολογισμό των τιμών μέσω των σχέσεων που προέκυψαν από τις δύο μεθοδολογίες είναι εμφανές ότι οι διαφορές μειώνονται σημαντικά. Πιο συγκεκριμένα, για το 90ο ποσοστημόριο η μέση τιμή της διαφοράς μεταξύ σταθμού και ERA5 Land είναι 8,8 mm και μειώνεται σε 5,5 mm με τις δύο μεθόδους quantile regression και τη μέθοδο Binning. Για το 95ο η μείωση είναι από 11,9 mm σε 5,1mm και με τις τρεις μεθόδους. Για το 99ο ποσοστημόριο η διαφορά μειώνεται αντίστοιχα από 22 mm σε 4,1 mm (CC), 3,9 mm (CC+) και 4,5 mm (Binning).

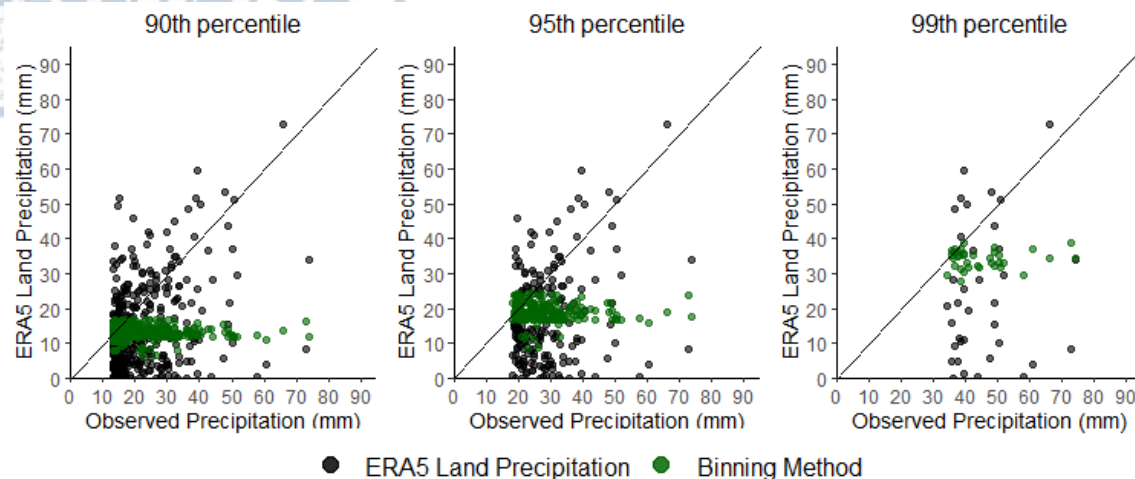


Σχήμα 6.1.10: Violin plots των διαφορών των παρατηρήσεων του σταθμού από τα αρχικά ERA5 Land (μαύρο) και τα ERA5 Land επανυπολογισμένα με το μοντέλο CC (κόκκινο), CC+ (κίτρινο) και την μέθοδο Binning (πράσινο) για το 90^ο, 95^ο και 99^ο ποσοστημόριο των τριών τιμών βροχόπτωσης αθροισμένων στο 24ωρο.

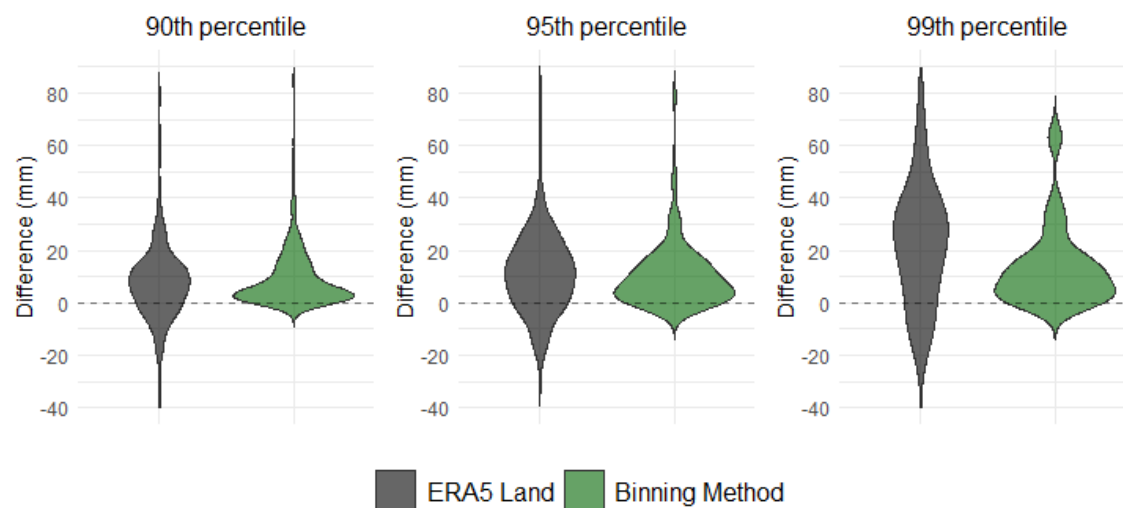
Συμπερασματικά, στην περίπτωση των τριών τιμών η εφαρμογή των παρατηρούμενων σχέσεων και από τις τρεις μεθόδους έχει όμοια αποτελέσματα. Και με τις τρεις μεθόδους παρατηρείται σημαντική μείωση της υποεκτίμησης, με την διαφορά παρατηρήσεων-δεδομένων reanalysis να πέφτει κάτω από τα 5,5mm και για τα τρία ανώτερα ποσοστημόρια, χωρίς να προκρίνεται κάποια από αυτές ως ανώτερη.

6.1.3. Ημερήσια δεδομένα

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφ.4.2.3 υπάρχει αδυναμία εφαρμογής των μεθόδων quantile regression στα ημερήσια δεδομένα του σταθμού. Για τον λόγο αυτό μελετάται η εφαρμογή μόνο της μεθόδου binning, η οποία δεν εμφάνισε σημαντικές διαφορές από τις δύο μεθόδους quantile regression στα ωριαία και τριώρα δεδομένα. Για την περίπτωση των ημερήσιων τιμών, αντίθετα με τα ωριαία και ημερήσια, δεν προκύπτει υποεκτίμηση για όλες τις τιμές (Σχήμα 6.1.11). Το ποσοστό υποεκτίμησης είναι μικρότερο ενώ παράλληλα σημαντικός αριθμός επεισοδίων υπερεκτιμάται. Και σε αυτήν την περίπτωση ωστόσο τα ποσοστά υποεκτίμησης υπερβαίνουν το 70%. Για το 90ο ποσοστημόριο, υποεκτιμάται ένα 72,3% των περιπτώσεων και το υπόλοιπο 27,7% υπερεκτιμάται. Για το 95°, υποεκτιμάται το 75,8% και υπερεκτιμάται το 24,2% ενώ για το 99° υποεκτιμάται το 78,9% και υπερεκτιμάται το 21,5%. Με την εφαρμογή των σχέσεων της μεθόδου binning που παρουσιάζεται στο Κεφ.4.2.3, οι νέες τιμές συγκεντρώνονται σε μια στενή ζώνη με εντάσεις 10-20 mm/ημέρα για το 90° ποσοστημόριο, 15-25 mm/ημέρα για το 95° και 30-40 mm/ημέρα για το 99°. Πάρα το γεγονός ότι μειώνεται το μεγαλύτερο μέρος της υποεκτίμησης, ένας σημαντικός αριθμός περιπτώσεων, οι οποίες καταγράφονται καλά ή υπερεκτιμώνται ελαφρώς από τα ERA5, τείνει να υποεκτιμηθεί με την εφαρμογή της μεθόδου. Στο Σχήμα 6.1.12 παρουσιάζονται τα violin plots των διαφορών των δεδομένων του σταθμού από τα ERA5 Land και από τα διορθωμένα ERA5 Land μέσω της μεθόδου binning. Προκύπτει, ότι με την προσαρμογή των δεδομένων οι διαφορές τείνουν προς το μηδέν. Η συγκέντρωση των τιμών είναι μεγαλύτερη προς τις θετικές διαφορές υποδεικνύοντας το πρόβλημα της υποεκτίμησης ορισμένων τιμών, που καταγράφονται επαρκώς από τα δεδομένα reanalysis, με την εφαρμογή της διόρθωσης.



Σχήμα 6.1.11: Διαγράμματα διασποράς των ανώτερων ποσοστημορίων (90^ο, 95^ο και 99^ο) των ημερήσιων τιμών βροχόπτωσης μεταξύ ERA5 Land και παρατηρήσεων σταθμού (μαύρο) και μεταξύ ERA5 Land επανυπολογισμένων με τη μέθοδο Binning (πράσινο). Η ευθεία αντιστοιχεί στην $x=y$.



Σχήμα 6.1.12: Violin plots των διαφορών των παρατηρήσεων του σταθμού από τα αρχικά ERA5 Land (μαύρο) και τα ERA5 Land επανυπολογισμένα με την μέθοδο Binning (πράσινο) για το 90^ο, 95^ο και 99^ο ποσοστημόριο των ημερήσιων τιμών βροχόπτωσης.

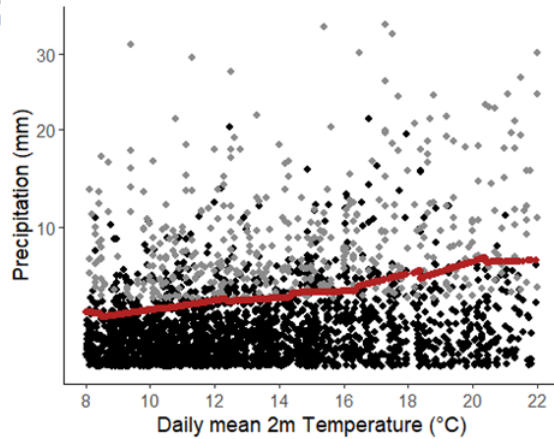
6.2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΠΡΟΣΟ- ΜΕΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

6.2.1. Ιστορική περίοδος 1971-2000

Για την ιστορική περίοδο του μοντέλου ICTP RegCM4-6 εφαρμόστηκαν οι τιμές που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου Binning στα δεδομένα του σταθμού (Κεφ. 4.2.2). Η εφαρμογή πραγματοποιήθηκε στα ανώτερα ποσοστημόρια (90° , 95° και 99°) των τρίωρων και ημερήσιων τιμών βροχόπτωσης του μοντέλου. Επιλέχθηκε το εύρος θερμοκρασιών μεταξύ 8 και 22°C στο οποίο εμφανίζονται οι μεγαλύτερες εντάσεις. Στα διαγράμματα των Σχημάτων 6.2.1,3,5-α απεικονίζονται οι περιπτώσεις που υπερβαίνουν το εκάστοτε ποσοστημόριο από το μοντέλο (μαύρο), οι διορθωμένες με την μέθοδο binning από τα δεδομένα του σταθμού (κόκκινο) καθώς και οι τιμές του αντίστοιχου ποσοστημορίου από το σταθμό για το συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος (γκρι) με σκοπό την σύγκριση. Επιπλέον, κατασκευάστηκαν τα box-plots των τριών αυτών δεδομένων βροχόπτωσης (Σχήματα 6.2.1,3,5-β) για καλύτερη εκτίμηση της πιθανής βελτίωσης των ακραίων τιμών βροχόπτωσης του μοντέλου από την εφαρμογή της μεθόδου binning. Παράλληλα, μελετάται η διαφορά μεταξύ των διορθωμένων τιμών και των αρχικών τιμών του μοντέλου σε σχέση με τη θερμοκρασία (Σχήματα 6.2.2,4,6).

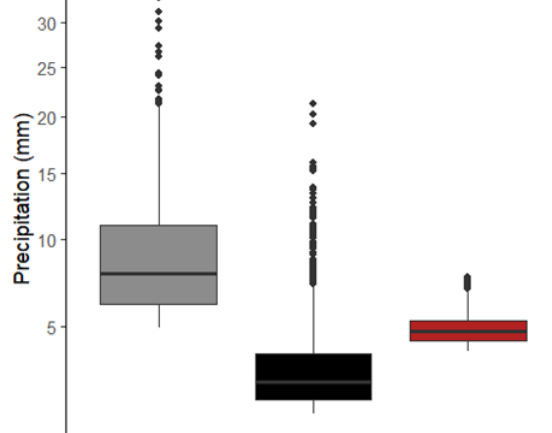
Για το 90° ποσοστημόριο (Σχήμα 6.2.1), παρατηρείται σημαντική υποεκτίμηση των ακραίων τιμών από το μοντέλο συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές του σταθμού κατά την ίδια χρονική περίοδο (1971-2000). Συγκεκριμένα η πλειοψηφία των τιμών του $90^{\text{ου}}$ ποσοστημορίου του μοντέλου έχει ένταση μικρότερη από $5\text{ mm}/3\text{h}$ την ώρα που από τα δεδομένα του σταθμού το ενδοτεταρτομοριακό εύρος των τρίωρων εντάσεων κυμαίνεται μεταξύ 7 - 12 mm . Με την εφαρμογή της μεθόδου binning, οι εντάσεις του μοντέλου βρίσκονται σε ένα εύρος κοντά στα 5 mm . Παρά το γεγονός ότι εξακολουθούν να βρίσκονται χαμηλότερα από τις παρατηρήσεις, όπως και στην περίπτωση των δεδομένων reanalysis οι νέες τιμές βρίσκονται πιο κοντά στα δεδομένα του σταθμού υποδεικνύοντας ότι υπάρχει βελτίωση των τιμών.

α) 90th percentile
Historical period 1971-2000

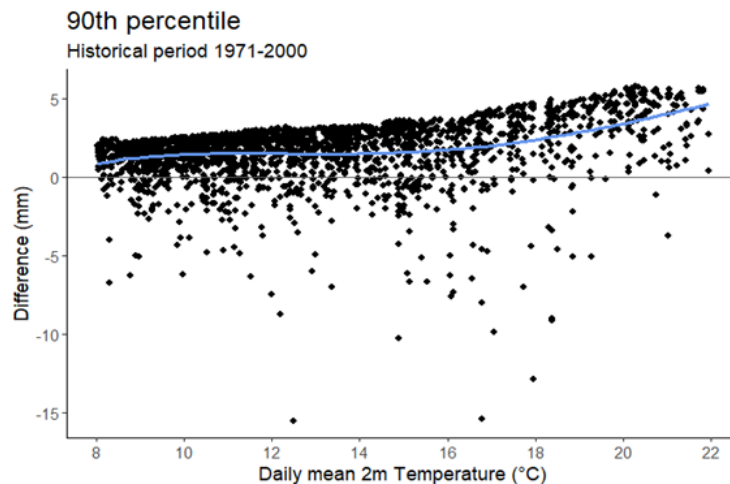


● Observations ● RegCM4-6 ● Binning method

β)



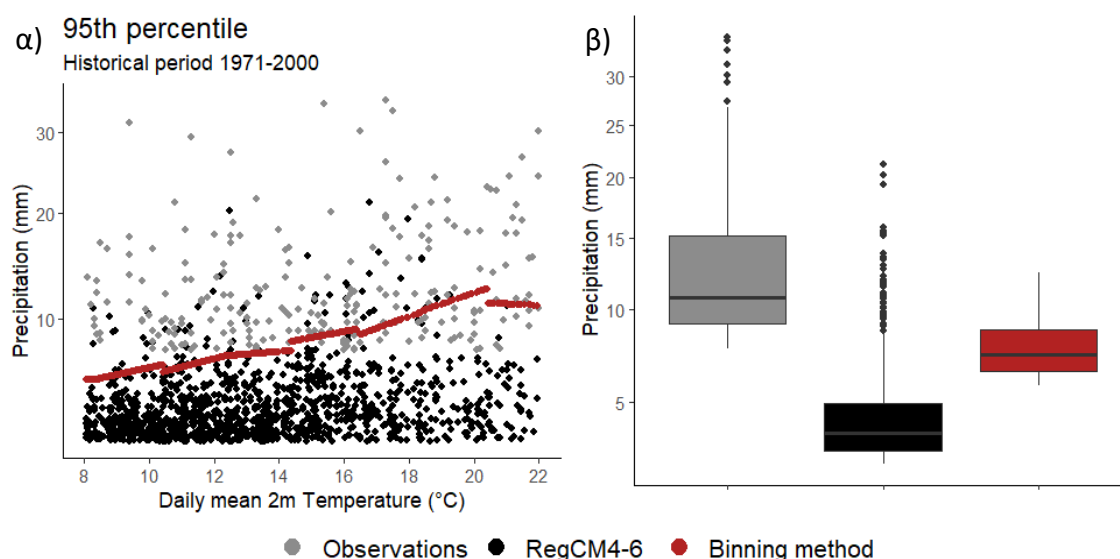
Σχήμα 6.2.1: Κατανομή τριών εντάσεων βροχόπτωσης (>90° ποσοστημόριο) κατά την περίοδο 1971-2000 από τα δεδομένα του σταθμού (γκρι), το μοντέλο ICTP-RegCM4-6 (μαύρο) και τις επανυπολογισμένες τιμές του μοντέλου με την μέθοδο Binning (κόκκινο). α) Σε σχέση με τη θερμοκρασία, β) με μορφή θηκογραμμάτων.



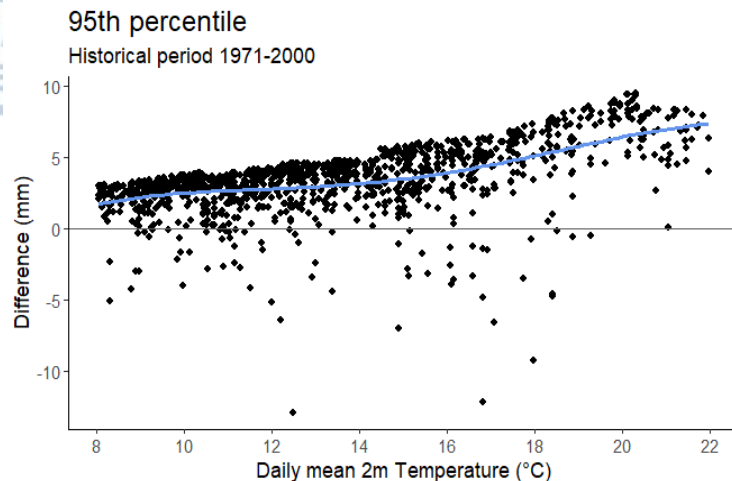
Σχήμα 6.2.2: Κατανομή των διαφορών μεταξύ επανυπολογισμένων τιμών με τη μέθοδο Binning και των αρχικών τιμών του μοντέλου για τις τριώρες τιμές βροχόπτωσης (>90° ποσοστημόριο) σε σχέση με την μέση ημερήσια θερμοκρασία.

Παρόμοια είναι τα αποτελέσματα και για το 95° ποσοστημόριο (Σχήμα 6.2.3) όπου η πλειοψηφία των τιμών των ακραίων βροχοπτώσεων από το μοντέλο έχει ένταση <5mm/3h. Η ένταση των ακραίων επεισοδίων για την περίοδο 1971-2000 από τα δεδομένα του σταθμού είναι κατά μέσο όρο 11-12 mm/3h. Στην διόρθωση των τιμών του μοντέλου με την μέθοδο binning οι εντάσεις βελτιώνονται σημαντικά παρότι παραμένουν

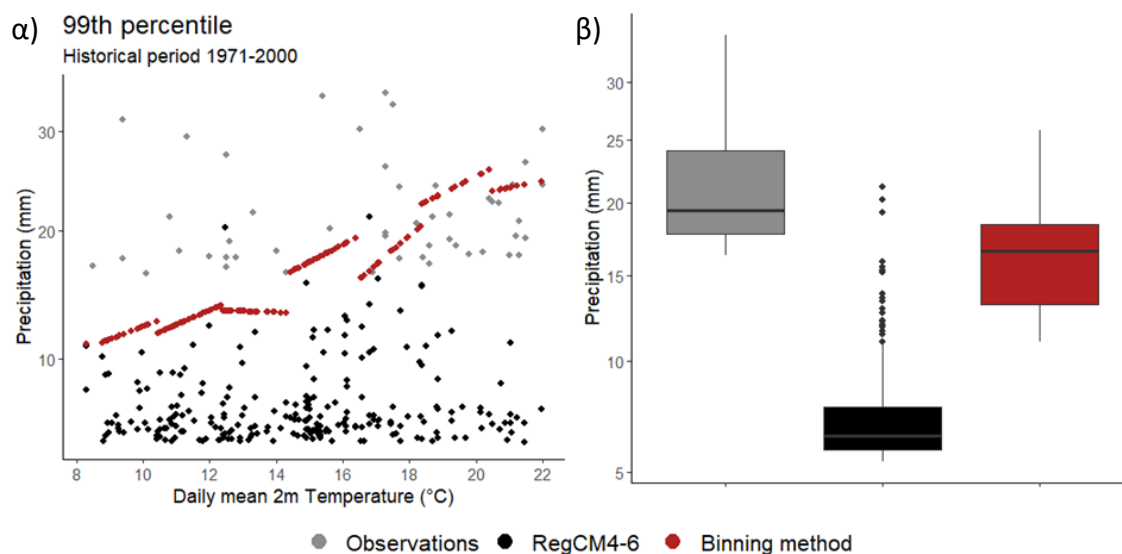
χαμηλότερες από τις παρατηρήσεις του σταθμού. Η βελτίωση είναι μεγαλύτερη για τα επεισόδια που εμφανίζονται σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Η προσαρμογή των δεδομένων του μοντέλου με τη μέθοδο binning φαίνεται να είναι ακόμα καλύτερη για τις πιο ακραίες τιμές (99^ο ποσοστημόριο) (Σχήμα 6.2.5). Στην περίπτωση αυτή, οι τιμές του σταθμού στην πλειοψηφία του κυμαίνονται μεταξύ 18 και 24 mm και με την εφαρμογή της μεθόδου binning οι τιμές είναι μεταξύ 13 και 19 mm από τα 6-8mm που ήταν οι αρχικές τιμές του μοντέλου. Ομοίως με τα υπόλοιπα ποσοστημόρια, η βελτίωση των ακραίων εντάσεων είναι καλύτερη σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες.



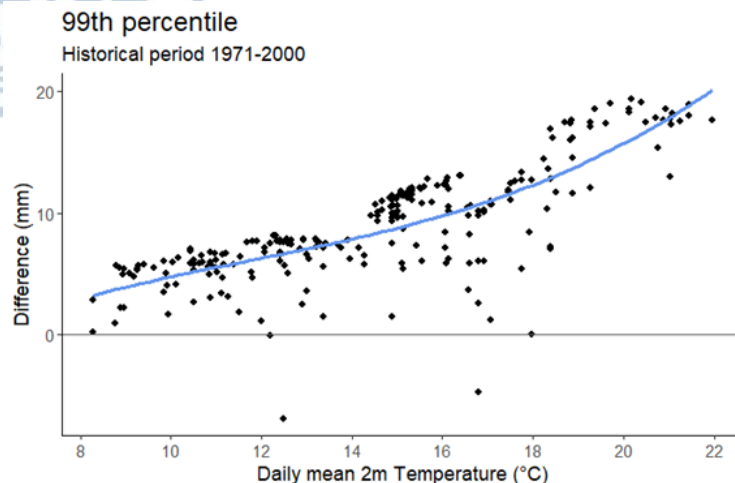
Σχήμα 6.2.3: Κατανομή τριών εντάσεων βροχόπτωσης (>95^ο ποσοστημόριο) κατά την περίοδο 1971-2000 από τα δεδομένα του σταθμού (γκρι), το μοντέλο ICTP-RegCM4-6 (μαύρο) και τις επανυπολογισμένες τιμές του μοντέλου με την μέθοδο Binning (κόκκινο). α) Σε σχέση με τη θερμοκρασία, β) με μορφή θηκογραμμάτων.



Σχήμα 6.2.4: Κατανομή των διαφορών μεταξύ επανυπολογισμένων τιμών με τη μέθοδο Binning και των αρχικών τιμών του μοντέλου για τις τρίωρες τιμές βροχόπτωσης (>95^ο ποσοστημόριο) σε σχέση με την μέση ημερήσια θερμοκρασία.



Σχήμα 6.2.5: Κατανομή τρίωρων εντάσεων βροχόπτωσης (>99^ο ποσοστημόριο) κατά την περίοδο 1971-2000 από τα δεδομένα του σταθμού (γκρι), το μοντέλο ICTP-RegCM4-6 (μαύρο) και τις επανυπολογισμένες τιμές του μοντέλου με την μέθοδο Binning (κόκκινο). α) Σε σχέση με τη θερμοκρασία, β) με μορφή θηκογραμμάτων.



Σχήμα 6.2.6: Κατανομή των διαφορών μεταξύ επανυπολογισμένων τιμών με τη μέθοδο Binning και των αρχικών τιμών του μοντέλου για τις τριώρες τιμές βροχόπτωσης (>99^ο ποσοστημόριο) σε σχέση με την μέση ημερήσια θερμοκρασία.

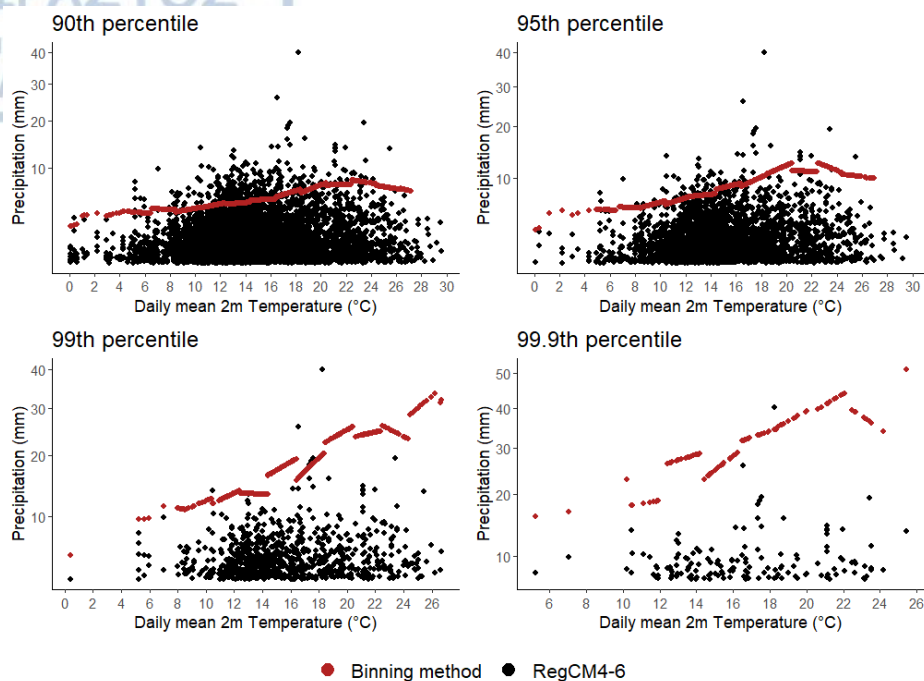
Από τα διαγράμματα των διαφορών των διορθωμένων τιμών από τις αρχικές του μοντέλου (Σχήματα 6.2.2,4,6) προκύπτει ότι σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες η υποεκτίμηση του μοντέλου είναι μεγαλύτερη καθώς η διαφορά αυξάνεται. Το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψιν την αύξηση της έντασης των ακραίων με τη θερμοκρασία. Το τελευταίο, αποδεικνύεται και από τα διαγράμματα των Σχημάτων 4.2.1, 6.2.3, 6.2.5 όπου οι εντάσεις από το μοντέλο παρουσιάζουν σχετική ισοκατανομή στις διάφορες θερμοκρασίες, με εξαίρεση ορισμένες μεγαλύτερες τιμές σε θερμοκρασίες 12-18 °C.

6.2.2. Μελλοντική περίοδος 2071-2100

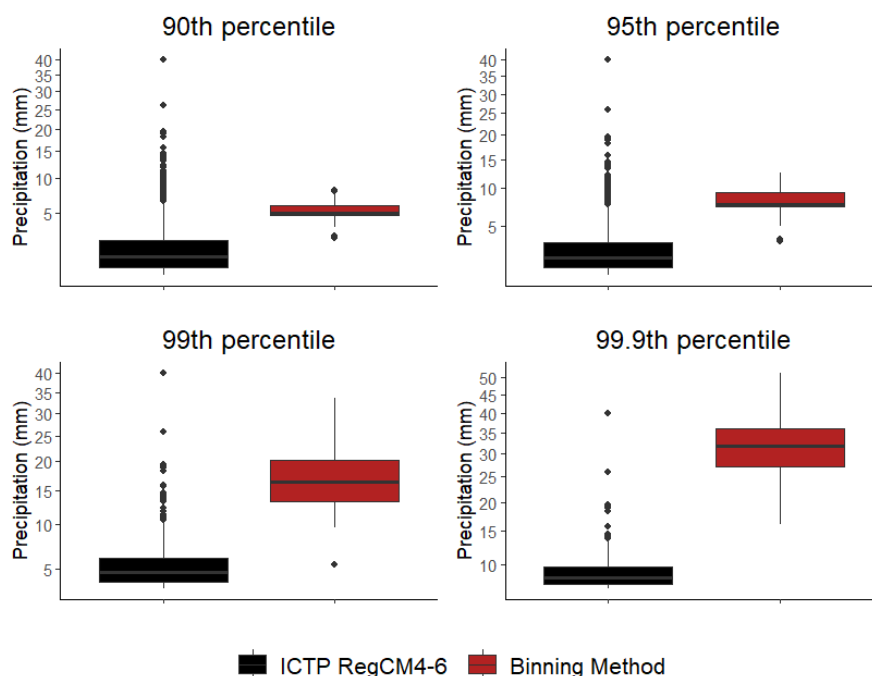
Με δεδομένο ότι η βελτίωση των δεδομένων κατά την ιστορική περίοδο του μοντέλου ICTP-RegCM4-6 είναι σημαντική, εφαρμόστηκε η ίδια μεθοδολογία για την διόρθωση των ακραίων βροχοπτώσεων κατά την μελλοντική περίοδο 2071-2100. Στην περίπτωση αυτή ως ακραία ποσοστημόρια χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές του μοντέλου κατά την ιστορική περίοδο. Οι μέσες ημερήσιες τιμές θερμοκρασίας του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν ως προγνωστικές παράμετροι στη σχέση για τις τριώρες τιμές από τη μεθοδολογία binning που εφαρμόστηκε στο Κεφ.4.2.2.2, και προέκυψαν οι προβλεπόμενες τιμές. Στο Σχήμα 6.2.7 δίνονται οι ακραίες περιπτώσεις για το εκάστοτε ποσοστημόριο του μοντέλου σε σχέση με τη θερμοκρασία (μαύρο) και για τις ίδιες περιπτώσεις οι προβλεπόμενες βάση

της μεθόδου binning (κόκκινο). Οι τιμές του μοντέλου, και για τα τέσσερα ποσοστημόρια, είναι πολύ χαμηλότερες από τις αναμενόμενες για τις θερμοκρασίες αυτές βάση των δεδομένων του σταθμού. Όπως διακρίνεται και από τα θηκογράμματα (Σχήμα 6.2.8) με την εφαρμογή των σχέσεων της μεθόδου binning από τα δεδομένα του σταθμού οι τιμές βροχόπτωσης αυξάνονται σημαντικά για όλα τα ποσοστημόρια. Η αύξηση είναι αντίστοιχη αυτής που παρατηρήθηκε και κατά την ιστορική περίοδο. Πιο συγκεκριμένα, για το 90° ποσοστημόριο οι αναμενόμενες εντάσεις τριώρου εμφανίζουν ενδοτεταρτομοριακό εύρος μεταξύ 1-2 mm και με την εφαρμογή των σχέσεων από τα δεδομένα του σταθμού αυτό ανέρχεται στα 5-6 mm. Για το 95° από τα 2-3 mm ανέρχεται στα 8-10 mm, για το 99° από τα 4-6 mm στα 14-21 mm και για το 99,9° από τα 8-10 mm στα 26-35 mm.

Το μοντέλο δίνει τις μεγαλύτερες τιμές τρίωρης βροχόπτωσης σε θερμοκρασίες 10-24°C. Σε θερμοκρασίες >24°C τα ύψη μειώνονται. Για το 90° και 95° ποσοστημόριο, σε αυτές τις θερμοκρασίες παρατηρείται μείωση και στις τιμές από τη μέθοδο binning. Πράγματι από τα δεδομένα του σταθμού, έχει παρατηρηθεί η εμφάνιση αρνητικής σχέσης των ακραίων τιμών βροχόπτωσης με τη θερμοκρασία για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 22-24°C. Συμπερασματικά, προκύπτει ότι παρότι το μοντέλο υποεκτιμά σημαντικά τα ακραία ύψη βροχής, είναι σε θέση να εντοπίσει το θερμοκρασιακό όριο πάνω από το οποίο οι εντάσεις μειώνονται.



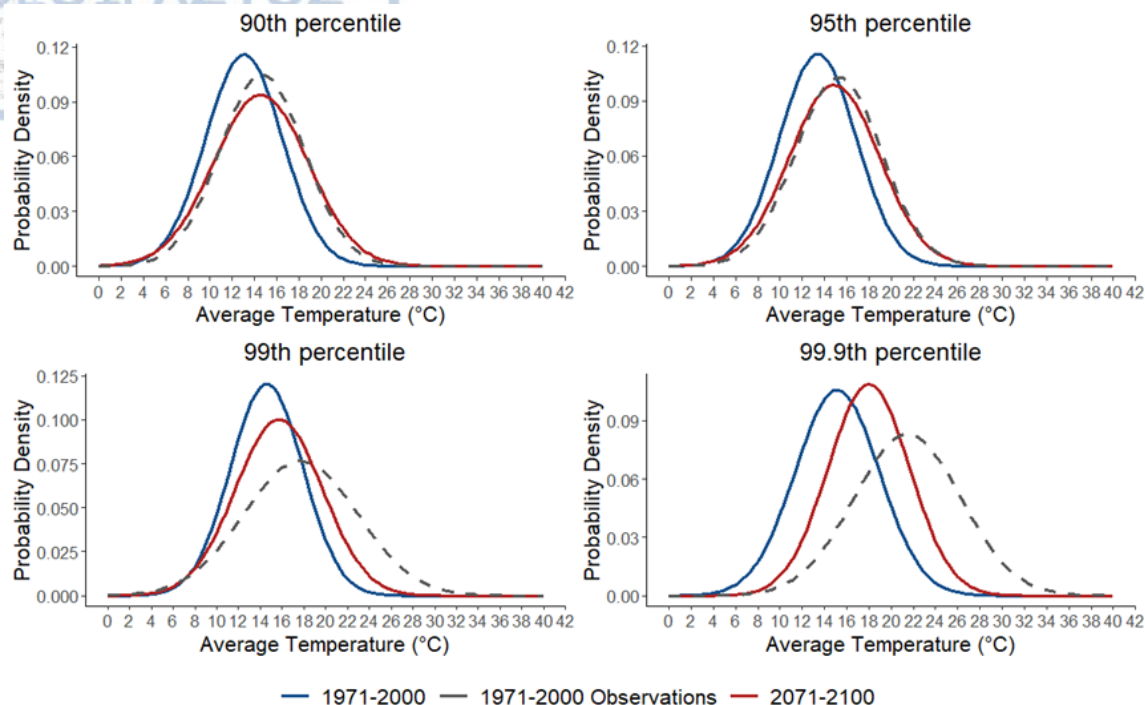
Σχήμα 6.2.7: Κατανομή των ανώτερων ποσοστημοριών (90^ο, 95^ο, 99^ο και 99,9^ο) της τρίωρης βροχόπτωσης του μοντέλου ICTP-RegCM4-6 κατά την μελλοντική περίοδο 2071-2100 υπό το σενάριο RCP8.5 (μαύρο) και των προβλεπόμενων βάσει της μεθόδου Binning τιμών (κόκκινο) σε σχέση με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία.



Σχήμα 6.2.8: Θηκογράμματα των ανώτερων ποσοστημοριών (90^ο, 95^ο, 99^ο και 99,9^ο) της τρίωρης βροχόπτωσης του μοντέλου ICTP-RegCM4-6 κατά την μελλοντική περίοδο 2071-2100 υπό το σενάριο RCP8.5 (μαύρο) και των προβλεπόμενων βάσει της μεθόδου Binning τιμών (κόκκινο).

6.2.3. Σύγκριση ιστορικής-μελλοντικής περιόδου

Ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο για την πρόληψη των επιπτώσεων των ακραίων βροχοπτώσεων αποτελεί η εύρεση των θερμοκρασιών στις οποίες παρουσιάζουν την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης, καθώς και αν αυτό το θερμοκρασιακό εύρος αναμένεται να μεταβληθεί στο μέλλον. Για τον λόγο αυτό, υπολογίστηκαν οι καμπύλες της συνάρτησης κατανομής πιθανοτήτων (Probability Distribution Function- PDF) των ακραίων ποσοστημορίων βροχόπτωσης σε σχέση με τη θερμοκρασία, για την ιστορική και μελλοντική περίοδο του μοντέλου (Σχήμα 6.2.9). Παράλληλα, προκειμένου να αξιολογηθεί η ικανότητα του μοντέλου στην καταγραφή και προσομοίωση των θερμοκρασιών αυτών, κατασκευάστηκαν και οι καμπύλες PDF για την περίοδο 1971-2000 από τα δεδομένα του σταθμού. Οι θερμοκρασίες στις οποίες παρατηρείται το μέγιστο εμφάνισης ακραίων για τα τέσσερα ποσοστημόρια κατά την ιστορική περίοδο (1971-2000) του μοντέλου είναι 13 °C για το 90°, 14 °C για το 95°, 15 °C για το 99° και 16 °C για το 99,9°. Οι αντίστοιχες θερμοκρασίες κατά την μελλοντική περίοδο είναι 15 °C, 15,5 °C, 17 °C και 19 °C. Αναμένεται συνεπώς μια μετακίνηση των ακραίων σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες κατά 2-3 °C, όση είναι περίπου η αναμενόμενη αύξηση στη μέση θερμοκρασία μεταξύ των δύο περιόδων του μοντέλου (Κεφ.4.3.3). Η μετάβαση ωστόσο σε υψηλότερες θερμοκρασίες, εφόσον η σχέση βροχόπτωσης-θερμοκρασίας που υπολογίστηκε για τον σταθμό είναι αυξητική μέχρι τους 21-22 °C, αναμένεται να οδηγήσει σε μεγαλύτερα ύψη βροχής στο μέλλον.



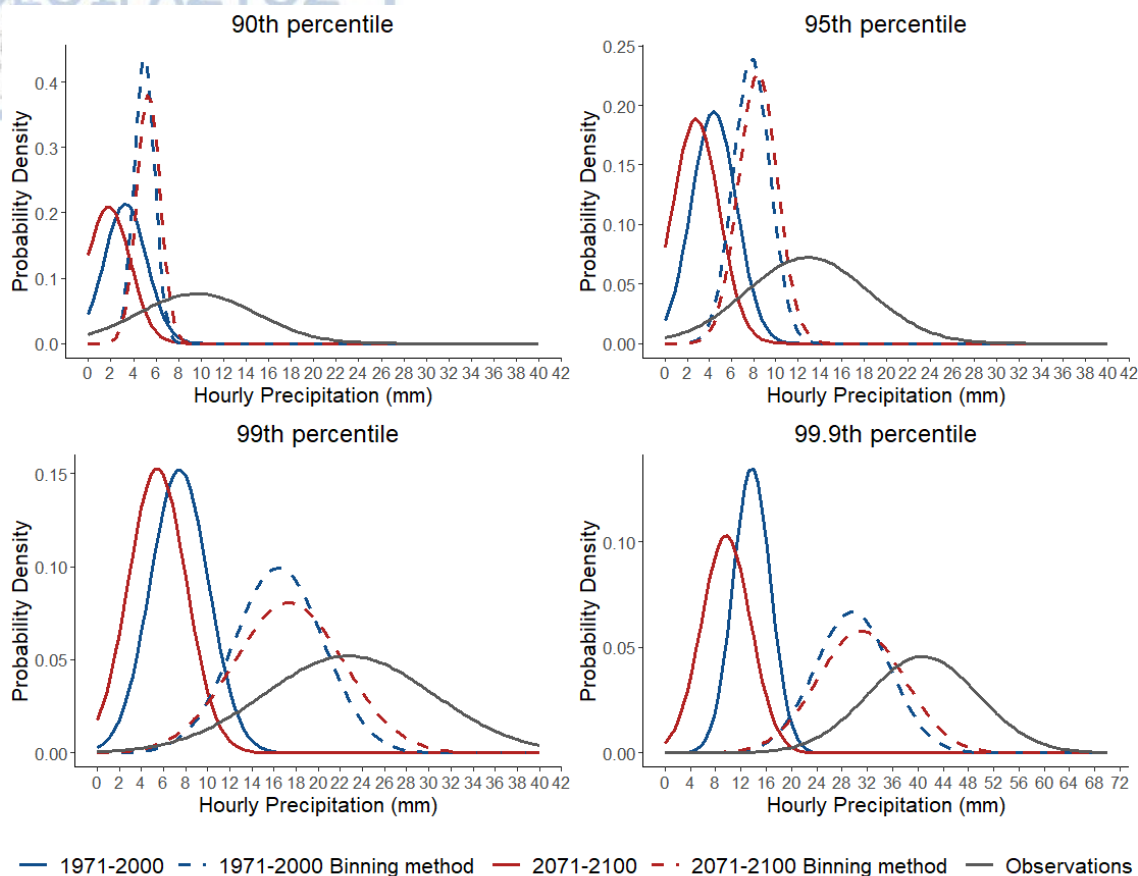
Σχήμα 6.2.9: Καμπύλες Probability Distribution Function (PDF) των δεδομένων ακραίας βροχόπτωσης του μοντέλου ICTP-RegCM4-6 για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια (90^ο, 95^ο, 99^ο και 99,9^ο) σε σχέση με τη θερμοκρασία. Με μπλε για την ιστορική περίοδο του μοντέλου (1971-2000), με κόκκινο για την μελλοντική περίοδο (2071-2100) υπό το σενάριο RCP8.5. Με διακεκομμένη δίνεται η καμπύλη PDF από τα δεδομένα του σταθμού για την περίοδο 1971-2000.

Από τις καμπύλες PDF για τα δεδομένα του σταθμού κατά την περίοδο 1971-2000 ωστόσο, διακρίνεται ότι η μέγιστη πιθανότητα εμφάνισης των ακραίων τιμών βρίσκεται σε θερμοκρασίες ίσες (90^ο και 95^ο ποσοστημόριο) ή και ακόμα μεγαλύτερες (99^ο και 99,9^ο) από αυτές που προσομοιώνει το μοντέλο για την μελλοντική περίοδο 2071-2100. Συγκεκριμένα το μέγιστο για τα τέσσερα ποσοστημόρια από τα δεδομένα του σταθμού είναι 15 °C για το 90^ο ποσοστημόριο, 16 °C για το 95^ο, 18 °C για το 99^ο και 22 °C για το 99,9^ο. Κατά συνέπεια, υπάρχει αδυναμία καταγραφής των θερμοκρασιών εμφάνισης των ακραίων από το μοντέλο. Αν ωστόσο η μεταβολή στις θερμοκρασίες από το μοντέλο θεωρηθεί ακριβής, τότε στο μελλοντικό κλίμα αναμένεται η εμφάνιση ακραίων με μέγιστη συχνότητα σε θερμοκρασίες >17 °C. Επομένως, με βάση την καθορισμένη σχέση για το σταθμό, ακόμα μεγαλύτερα ακραία ύψη βροχής θα πρέπει να αναμένονται.

Στο Σχήμα 6.2.10 παρουσιάζονται οι καμπύλες pdf για τις περιπτώσεις του 90^{ου}, 95^{ου} και 99^{ου} ποσοστημορίου ως προς την τρίωρη ένταση βροχόπτωσης. Αρχικά παρατηρείται

η σημαντική υποεκτίμηση των ακραίων τιμών. Για την περίοδο 1971-2000 οι βροχοπτώσεις των τριών ποσοστημορίων από το μοντέλο εμφανίζουν τιμές μικρότερες από 8 mm (μπλε συνεχείς γραμμές). Από τις παρατηρήσεις του σταθμού για την ίδια χρονική περίοδο, η μέγιστη συχνότητα εμφάνισης εντοπίζεται περίπου στα 10 mm για το 90^ο ποσοστημόριο, 13 mm για το 95^ο και 23 mm για το 99^ο. Παράλληλα, διακρίνεται ότι κατά την περίοδο 2071-2100, υπό το σενάριο RCP8.5, σύμφωνα με το μοντέλο ICTP-RegCM4-6 η μέγιστη πιθανότητα εμφάνισης εντοπίζεται σε ακόμα μικρότερες τρίωρες εντάσεις κατά σχεδόν 2 mm (κόκκινες συνεχείς γραμμές). Επομένως, αναμένεται μείωση στην επικρατούσα ένταση κατά τη μελλοντική περίοδο.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 6.2.10, απεικονίζονται επιπλέον οι καμπύλες PDF για τις υπολογισμένες τιμές βροχόπτωσης του μοντέλου από τα δεδομένα του σταθμού με βάση τη μεθοδολογία binning για τις δύο περιόδους (διακεκομμένες γραμμές). Από τις διορθωμένες αυτές τιμές, εντοπίζεται η σημαντική αύξηση των επικρατούντων υψών βροχόπτωσης για κάθε ποσοστημόριο και για τις δύο περιόδους όπως περιεγράφηκε νωρίτερα. Πιο αναλυτικά, η μέγιστη πιθανότητα εμφανίζεται στα 5-6 mm για το 90^ο ποσοστημόριο συγκριτικά με τα 1-2 mm του μοντέλου, στα 8-9 mm για το 95^ο (από τα 3-5 mm) και στα 16-17 mm για το 99^ο (από τα 5-7 mm). Αξίζει να αναφερθεί, ότι με τις διορθωμένες τιμές, η μέγιστη πιθανότητα δεν εντοπίζεται σε χαμηλότερα ύψη βροχής όπως στις αρχικές τιμές του μοντέλου. Αντιθέτως, η μέγιστη τιμή βάση των συναρτήσεων PDF εμφανίζεται σε παρόμοιες και ελαφρώς μεγαλύτερες εντάσεις βροχόπτωσης και ως εκ' τούτου θα μπορούσε να αναμένεται παρόμοια ή και μεγαλύτερη ένταση των ακραίων στο μελλοντικό κλίμα. Θα πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι παρά την βελτίωση των ακραίων τιμών του μοντέλου, με την εφαρμογή των σχέσεων που προέκυψαν από τα δεδομένα παρατήρησης, οι τιμές παραμένουν μικρότερες από αυτές που έχουν καταγραφεί στο σταθμό.



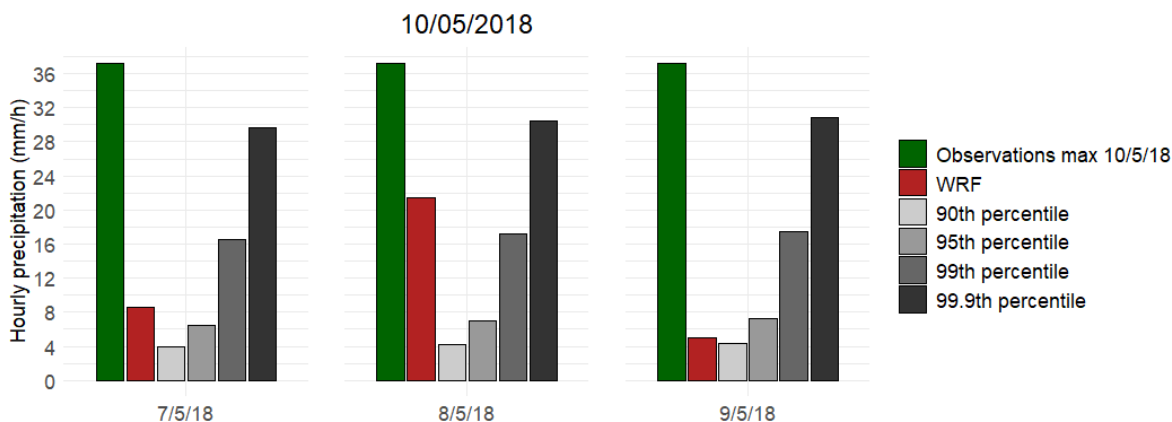
Σχήμα 6.2.10: Καμπύλες Probability Distribution Function (PDF) των δεδομένων ακραίας βροχόπτωσης του μοντέλου ICTP-RegCM4-6 για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια (90^ο, 95^ο, 99^ο και 99,9^ο) σε σχέση με το ύψος βροχής. Για την ιστορική περίοδο του μοντέλου (1971-2000)(μπλε συνεχής καμπύλη), την ιστορική περίοδο υπολογισμένη με τη μέθοδο Binning (μπλε διακεκομμένη καμπύλη). Για την μελλοντική περίοδο (2071-2100) υπό το σενάριο RCP8.5 (κόκκινη συνεχής καμπύλη) και για την μελλοντική περίοδο υπολογισμένη με τη μέθοδο Binning (κόκκινη διακεκομμένη καμπύλη). Με διακεκομμένη γκρι γραμμή δίνεται η καμπύλη PDF από τα δεδομένα του σταθμού για την περίοδο 1971-2000.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΣΕ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ

Προκειμένου να αξιολογηθεί η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε ως ένα εργαλείο εκτίμησης των ακραίων βροχοπτώσεων, εφαρμόστηκαν οι σχέσεις του κεφαλαίου 4.2.1.2 στις προγνώσεις του περιοχικού μοντέλου WRF του Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας. Συγκεκριμένα, για τέσσερις περιπτώσεις στις οποίες σημειώθηκε ακραία ένταση στο σταθμό, χρησιμοποιήθηκαν οι προγνώσεις 24,48 και 72 ώρες πριν την ημέρα εκδήλωσης. Με σκοπό να υπάρχει καλύτερη κάλυψη, επιλέχθηκε το σύνολο των grid points πάνω από την περιοχή της Θεσσαλονίκης και για την ημέρα στην οποία εκδηλώθηκε το ακραίο επεισόδιο υπολογίστηκε η μέση θερμοκρασία και η μέγιστη ωριαία ένταση βροχής από αυτά. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε η σχέση που καθορίστηκε από τα δεδομένα του σταθμού στην μέση θερμοκρασία από την πρόγνωση του μοντέλου και υπολογίστηκαν τα ανώτερα ποσοστημόρια. Με αυτόν τον τρόπο δίνονται οι αναμενόμενες ακραίες εντάσεις για την εκάστοτε θερμοκρασία βάση της μεθοδολογίας.

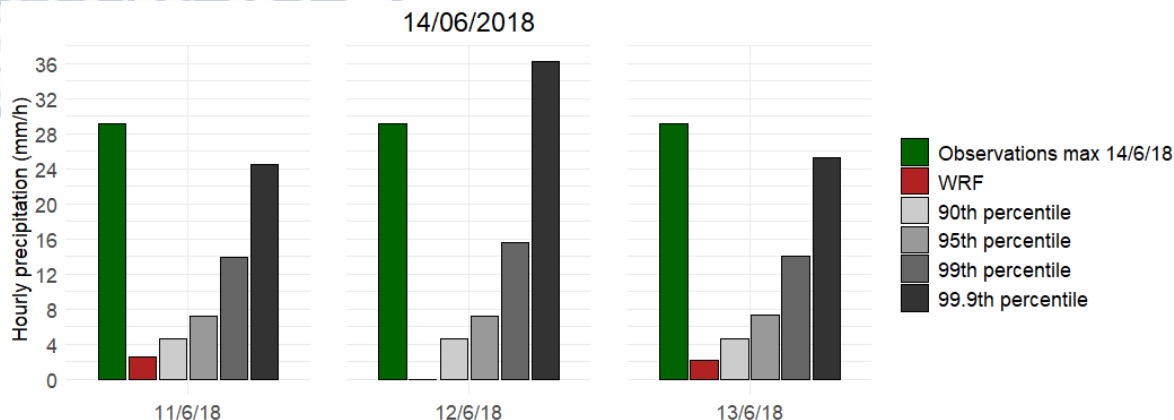
Κατά το επεισόδιο στις 10/5/2018 σημειώθηκε έντονη καταιγίδα κατά τις πρωινές ώρες η οποία έπληξε το κέντρο της Θεσσαλονίκης. Ο μετεωρολογικός σταθμός του ΑΠΘ κατέγραψε συνολικά 72,8 mm και σημειώθηκαν σοβαρά πλημμυρικά φαινόμενα στην πόλη. Η μέγιστη ωριαία βροχόπτωση έφτασε τα 37,2 mm μεταξύ 10:00-11:00, το οποίο αποτελεί ρεκόρ από το 1951 που τα δεδομένα είναι διαθέσιμα. Αξίζει να αναφερθεί ότι την αμέσως επόμενη ώρα (11:00-12:00) σημειώθηκαν 33,6 mm τα οποία αποτελούν και την δεύτερη μεγαλύτερη τιμή ωριαίας βροχόπτωσης. Στο Σχήμα 7.1.1 παρατίθεται η ωριαία βροχόπτωση (37,2 mm) που σημειώθηκε στις 10/5/18 (πράσινο) και η μέγιστη τιμή από την πρόγνωση του μοντέλου (κόκκινο) 3 ημέρες πριν (7/5/18), 2 ημέρες πριν (8/5/18) και 1 ημέρα πριν (9/5/18). Επιπλέον, για την μέση θερμοκρασία που έδινε το μοντέλο κατά την πρόγνωση υπολογίστηκαν τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια από την εφαρμογή της μεθόδου Binning. Προκύπτει ότι το μοντέλο παρουσιάζει χαμηλή δυνατότητα πρόγνωσης της ακραίας έντασης, παρά το γεγονός ότι η μέγιστη προβλεπόμενη ένταση στις 8/5 υπερβαίνει τα 20 mm τα οποία αποτελούν μια πολύ ακραία τιμή. Από την

εφαρμογή της μεθόδου Binning στη μέση ημερήσια θερμοκρασία, η τιμή του 99,9^{ου} ποσοστημορίου είναι 30,5 mm και συνεπώς αρκετά κοντά στην παρατηρούμενη τιμή.

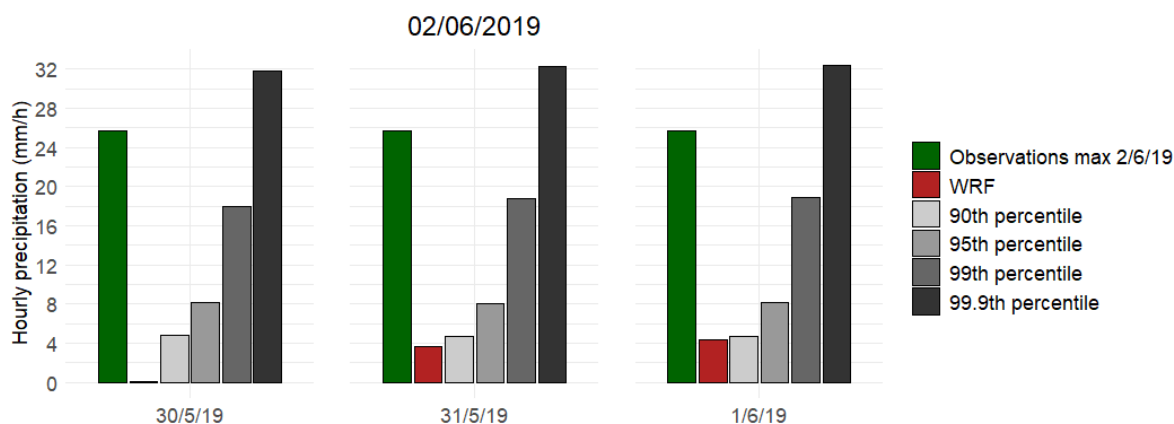


Σχήμα 7.1.1: Σύγκριση μεταξύ του προβλεπόμενου από την πρόγνωση του WRF μέγιστου ωριαίου ύψους βροχής (κόκκινο) τρεις, δύο και μία ημέρα πριν την εκδήλωση του ακραίου επεισοδίου, με την μέγιστη παρατηρούμενη ωριαία τιμή στις 10/5/18. Δίνονται τα ανώτερα αναμενόμενα ποσοστημόρια από την μεθοδολογία Binning των δεδομένων του σταθμού για την προβλεπόμενη μέση θερμοκρασία της ημέρας του επεισοδίου.

Αντιστοίχως, η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για το επεισόδιο της 14^{ης} Ιουνίου 2018. Κατά την ημέρα αυτή καταγράφηκε ωριαία βροχόπτωση 29,1 mm στον σταθμό. Όπως διακρίνεται στο Σχήμα 7.1.2 το WRF υποεκτιμά το συγκεκριμένο επεισόδιο δίνοντας 0-2,5 mm μέγιστη βροχόπτωση. Με την χρήση των σχέσεων της μεθόδου Binning, για το εύρος θερμοκρασιών 24,9-26,1 °C από την πρόγνωση του μοντέλου, η τιμή του 99,9^{ου} ποσοστημορίου κυμαίνεται μεταξύ 24,5 mm και 36,2 mm. Συνεπώς, με την χρήση της σχέσης ακραίων βροχοπτώσεων-θερμοκρασίας θα μπορούσε να εκτιμηθεί με ακρίβεια το αναμενόμενο ακραίο ύψος ωριαίας βροχόπτωσης. Παρόμοιο παράδειγμα αποτελεί και το επεισόδιο στις 2/6/19 (Σχήμα 7.1.3), με το μοντέλο να δίνει μέγιστη ένταση 0,1-3,6 mm υποεκτιμώντας τη μέγιστη τιμή των 25,7 mm που σημειώθηκαν τελικά. Με την εφαρμογή των σχέσεων της μεθόδου Binning, για μέση ημερήσια θερμοκρασία 21,3-21,9 °C κατά την ημέρα του επεισοδίου, το 99,9^ο ποσοστημόριο υπολογίστηκε στα 31,7 mm - 32,4 mm. Το 99^ο αντίστοιχα υπολογίστηκε μεταξύ 18 mm και 18,7 mm. Κατά συνέπεια, και σε αυτήν την περίπτωση θα μπορούσε να γίνει εκτίμηση της πιθανής ακραίας έντασης με μεγάλη ακρίβεια.



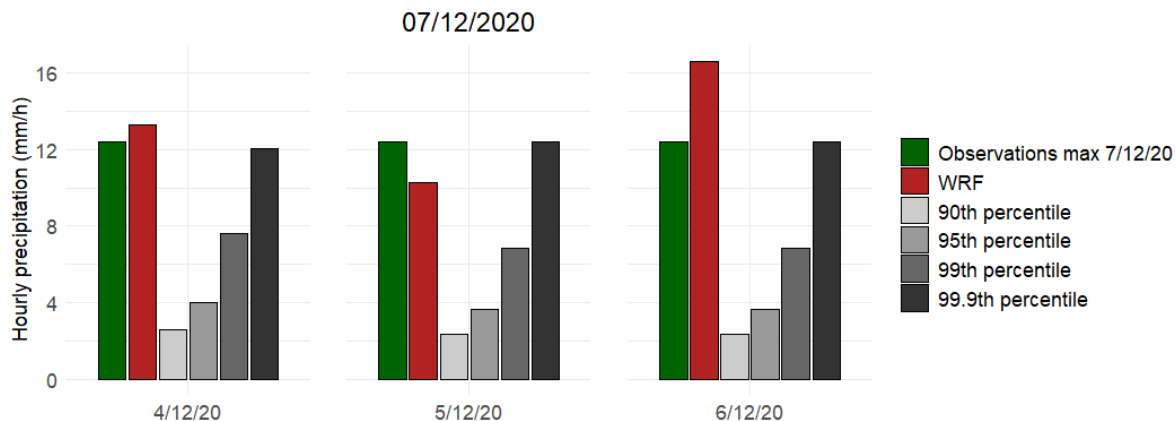
Σχήμα 7.1.2: Σύγκριση μεταξύ του προβλεπόμενου από την πρόγνωση του WRF μέγιστου ωριαίου ύψους βροχής (κόκκινο) τρεις, δύο και μία ημέρα πριν την εκδήλωση του ακραίου επεισοδίου, με την μέγιστη παρατηρούμενη ωριαία τιμή στις 14/6/18. Δίνονται τα ανώτερα αναμενόμενα ποσοστημόρια από την μεθοδολογία Binning των δεδομένων του σταθμού για την προβλεπόμενη μέση θερμοκρασία της ημέρας του επεισοδίου.



Σχήμα 7.1.3: Σύγκριση μεταξύ του προβλεπόμενου από την πρόγνωση του WRF μέγιστου ωριαίου ύψους βροχής (κόκκινο) τρεις, δύο και μία ημέρα πριν την εκδήλωση του ακραίου επεισοδίου, με την μέγιστη παρατηρούμενη ωριαία τιμή στις 2/6/19. Δίνονται τα ανώτερα αναμενόμενα ποσοστημόρια από την μεθοδολογία Binning των δεδομένων του σταθμού για την προβλεπόμενη μέση θερμοκρασία της ημέρας του επεισοδίου.

Τέλος, με σκοπό την μελέτη της αποτελεσματικότητας του μοντέλου και των παρατηρούμενων σχέσεων ακραίας βροχόπτωσης-θερμοκρασίας και κατά την χειμερινή περίοδο, μελετήθηκε κατά αντίστοιχο τρόπο με τα προηγούμενα, το επεισόδιο στις 7/12/2020 (Σχήμα 7.1.4). Η μέγιστη ωριαία βροχόπτωση που καταγράφηκε στον σταθμό ήταν 12,4 mm. Σε αυτήν την περίπτωση, οι προγνώσεις του μοντέλου ήταν σε θέση να προβλέψουν με μεγάλη ακρίβεια την τελική ένταση εκτιμώντας ένα εύρος μεταξύ 10,3

mm και 16,6 mm. Αντιστοίχως πολύ μεγάλη ακρίβεια έχει και η εκτίμηση της ακραίας έντασης από την μέθοδο Binning, με το 99,9^ο ποσοστημόριο να είναι μεταξύ 12,1 mm και 12,4 mm για τις μέσες θερμοκρασίες του μοντέλου.



Σχήμα 7.1.4: Σύγκριση μεταξύ του προβλεπόμενου από την πρόγνωση του WRF μέγιστου ωριαίου ύψους βροχής (κόκκινο) τρεις, δύο και μία ημέρα πριν την εκδήλωση του ακραίου επεισοδίου, με την μέγιστη παρατηρούμενη ωριαία τιμή στις 7/12/20. Δίνονται τα ανώτερα αναμενόμενα ποσοστημόρια από την μεθοδολογία Binning των δεδομένων του σταθμού για την προβλεπόμενη μέση θερμοκρασία της ημέρας του επεισοδίου.

Βάση των παραπάνω, προκύπτει ότι η εφαρμογή των παρατηρούμενων σχέσεων ακραίας βροχόπτωσης-θερμοκρασίας στα προγνωστικά δεδομένα, μία με τρεις ημέρες πριν την εκδήλωση του ακραίου, είναι σε θέση να δώσει μια ακριβή εκτίμηση του πιθανού ύψους βροχής. Το γεγονός αυτό, αποδεικνύει ότι πράγματι τα πολύ ακραία επεισόδια βροχής σε υπό-ημερήσιες κλίμακες, και στην προκειμένη περίπτωση τα ωριαία ακραία, περιορίζονται από την σχέση Clausius-Clapeyron. Κατά αυτόν το τρόπο, γνωρίζοντας μόνο την μέση θερμοκρασία της ημέρας και με βάση τον περιορισμό που θέτει η CC, μπορεί να εκτιμηθεί το ανώτατο αναμενόμενο ύψος βροχής σε περίπτωση που εκδηλωθεί κάποιο ακραίο. Το παραπάνω, μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ σημαντικό εργαλείο στην εκτίμηση και πρόληψη του πλημμυρικού κινδύνου στη Θεσσαλονίκη και σε άλλες περιοχές αντίστοιχα. Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας εφαρμόστηκε η μέθοδος σε τέσσερα μεμονωμένα επεισόδια. Κατά συνέπεια, απαιτείται περεταίρω μελέτη, με χρήση μεγάλου αριθμού περιπτώσεων για την εξαγωγή πιο βάσιμων συμπερασμάτων.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της σύνδεσης των ακραίων βροχοπτώσεων με τη θερμοκρασία βάση της εξίσωσης Clausius-Clapeyron για την Θεσσαλονίκη. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για την χρονική περίοδο 1951-2021 χρησιμοποιώντας τόσο την μέση ημερήσια θερμοκρασία όσο και το σημείο δρόσου για τον καθορισμό της σχέσης. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ωριαίες, τριώρες και ημερήσιες εντάσεις. Παράλληλα, δευτερεύον στόχος είναι η χρήση των σχέσεων που παρουσιάζουν τα δεδομένα παρατήρησης με σκοπό την βελτίωση των δεδομένων reanalysis και των μοντελικών προσομοιώσεων στα οποία παρατηρείται αδυναμία προσομοίωσης των ακραίων βροχοπτώσεων.

Σε πρώτη φάση, πραγματοποιήθηκε κλιματολογική ανάλυση των δεδομένων βροχόπτωσης από το μετεωρολογικό σταθμό του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης για την περίοδο 1951-2021 με έμφαση στις ακραίες τιμές. Για την περίοδο αυτή, το συνολικό ετήσιο ύψος υετού δεν παρουσιάζει αξιόλογη τάση μεταβολής, παρατηρείται μικρή αύξηση στον αριθμό των ακραίων επεισοδίων και στην συνεισφορά αυτών στον ετήσιο υετό χωρίς ωστόσο αυτή να είναι στατιστικά σημαντική, ενώ η μέση ένταση τους δεν εμφανίζει μεταβολή. Αντίστοιχα, οι Pakalidou & Karacosta, (2018) απέδειξαν ότι για την περιοχή της Θεσσαλονίκης δεν εμφανίζεται κάποια στατιστικά σημαντική τάση στη χρονοσειρά της ετήσιας βροχόπτωσης, ενώ παρατηρούνται θετικές αποκλίσεις από την δεκαετία του '60 και έπειτα. Τα μεγαλύτερα ύψη ακραίας βροχόπτωσης σημειώνονται τους θερινούς μήνες του έτους καθώς σχετίζονται με καταιγιδοφόρο δράση. Παράλληλα, έχει παρατηρηθεί ότι το μέγιστο της συχνότητας εμφάνισης ακραίων βροχοπτώσεων μετατοπίζεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες από την πρώτη προς την τελευταία τριακονταετία χωρίς να μεταβάλλεται η ένταση τους.

Για την εύρεση της σχέσης των ακραίων βροχοπτώσεων με τη θερμοκρασία και την σύγκριση της με τον ρυθμό που ορίζει η Clausius-Clapeyron πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή δύο μεθοδολογιών, της linear Quantile Regression και της μεθόδου Binning. Η εφαρμογή τους έδωσε παρόμοια αποτελέσματα για τις ωριαίες και τριώρες ακραίες τιμές,

με τις δύο μεθοδολογίες να είναι σε θέση να περιγράψουν καλά την παρατηρούμενη σχέση. Με την μέθοδο Quantile Regression υπολογίζονται δύο διαφορετικά μοντέλα, το απλό γραμμικό, CC model και το επίσης γραμμικό αλλά με θερμοκρασιακό σημείο καμψής, CC+ model. Η μέθοδος Quantile Regression πλεονεκτεί στο γεγονός ότι λαμβάνει υπόψιν το σύνολο της κατανομής των ακραίων τιμών για την κατασκευή των εξισώσεων ενώ επιπλέον είναι πιο απλή υπό την έννοια ότι δίνει μια γραμμική σχέση (υπολογίζει ένα γραμμικό μοντέλο για κάθε ποσοστημόριο). Αντιθέτως, η μεθοδολογία Binning διαχωρίζει τα επεισόδια σε θερμοκρασιακές κλάσεις και υπολογίζει τα ανώτερα ποσοστημόρια για κάθε μία από αυτές, παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο το πλεονέκτημα της πιο αναλυτικής και λεπτομερούς μελέτης της σχέσης των ακραίων βροχοπτώσεων με τη θερμοκρασία. Επιπρόσθετα, με την χρήση της μεθόδου Binning, καθίσταται δυνατή η ανίχνευση του θερμοκρασιακού ορίου, όπου σύμφωνα με Drobinski et al. (2016) στην περιοχή της Μεσογείου, το scaling παρουσιάζει αρνητική κλίση με τις υψηλές θερμοκρασίες (hook shape).

Από την στατιστική μελέτη της εφαρμογής των μεθόδων στα δεδομένα προκύπτει ότι η χρήση της θερμοκρασίας έναντι του σημείου δρόσου φαίνεται να έχει καλύτερη, αν και με μικρή διαφορά, εφαρμογή για τα δεδομένα του σταθμού. Αντίθετα, σε περιοχές με διαφορετικά κλιματικά χαρακτηριστικά, όπως είναι η Δυτική Ευρώπη και η Σκανδιναβία έχει αποδειχθεί ότι το σημείο δρόσου παρουσιάζει καλύτερη συσχέτιση με τις ακραίες βροχοπτώσεις (Van de Vyver et al., 2019). Οι ωριαίες τιμές παρουσιάζουν αύξηση με τη θερμοκρασία η οποία βρίσκεται σε συμφωνία με την σχέση Clausius-Clapeyron (CC), ενώ για τις πολύ ακραίες βροχοπτώσεις καταγράφεται ρυθμός που υπερβαίνει σημαντικά την σχέση αυτή (super-CC), φτάνοντας ακόμα και τα 2CC. Οι Lenderink et al., (2017); Molnar et al., (2015); Schroeer & Kirchengast (2018) παρουσίασαν αντίστοιχα αποτελέσματα για τις περιοχές της Ολλανδίας, Ελβετίας και Αυστρίας αντίστοιχα με την ανίχνευση scaling που υπερβαίνει και τα 2CC. Για τις τρίωρες τιμές, ο ρυθμός αυτός είναι μικρότερος εξακολουθώντας να είναι σε συμφωνία με την CC χωρίς ωστόσο να την υπερβαίνει, ενώ για τις ημερήσιες τιμές η μεταβολή είναι ακόμα μικρότερη και βρίσκεται χαμηλότερα από τον ρυθμό CC (sub-CC). Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε συμφωνία με αντίστοιχες μελέτες

παγκοσμίως (Berg et al., 2013; Martinkova & Kysely, 2020) και δείχνουν ότι όσο μικρότερη είναι η χρονική κλίμακα, τόσο εντονότερος ο ρυθμός αύξησης των ακραίων με τη θερμοκρασία. Ταυτόχρονα, ο διαχωρισμός της περιόδου σε χειμερινό και θερινό εξάμηνο έδειξε ότι οι ακραίες βροχοπτώσεις είναι πιο ευαίσθητες με τη θερμοκρασία τη θερμή περίοδο του έτους όταν οι ακραίες βροχοπτώσεις συνδέονται κυρίως με μικρής κλίμακας θερμικές καταιγίδες (Bisselink & Dolman, 2008). Σε ορισμένες περιπτώσεις η εντονότερη αύξηση σημειώνεται όταν ληφθεί ολόκληρη η περίοδος γεγονός που έχει παρατηρηθεί και από τους Molnar et al. (2015).

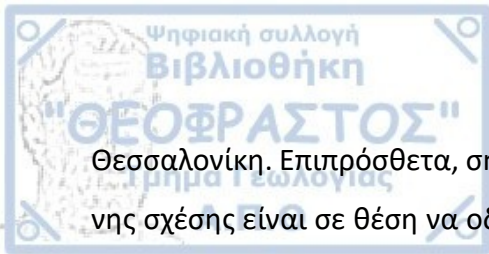
Τέλος, από τη μέθοδο Binning εντοπίστηκε το θερμοκρασιακό όριο από το οποίο και πάνω επικρατεί αρνητική σχέση, το οποίο βρίσκεται κατά μέσο όρο στους 21-22 °C για όλες τις χρονικές κλίμακες και τα περισσότερα ποσοστημόρια. Το όριο αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με Pakalidou et al. (2021) όπου για τον σταθμό της Θεσσαλονίκης εντοπίστηκε στους 20°C και είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το όριο των 7°C που έχει βρεθεί για την Ελλάδα σε προγενέστερες μελέτες (Drobinski et al., 2018).

Η αξιολόγηση των δεδομένων reanalysis ERA5 Land έδειξε ότι παρά την καλή συμφωνία που εμφανίζουν με τις παρατηρήσεις για τις μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες, παρουσιάζουν σημαντικό πρόβλημα υποεκτίμησης των ακραίων τιμών. Η υποεκτίμηση αυτή των πολύ ισχυρών επεισοδίων βροχόπτωσης έχει αναφερθεί σε μια πληθώρα ερευνών (Gomis-Cebolla et al., 2023; Jiang et al., 2021; Lavers et al., 2022) στις οποίες εντοπίζεται παράλληλα με μια υπερεκτίμηση στα μικρά ύψη βροχής. Επιπλέον, τόσο ο ρυθμός αύξησης με τη θερμοκρασία όσο και το θερμοκρασιακό όριο από το οποίο η σχέση γίνεται αρνητική βρέθηκαν μικρότερα συγκριτικά με τα πραγματικά δεδομένα κατά την εκτέλεση της μεθόδου Binning στα ERA5 Land. Με την εφαρμογή των υπολογισθέντων εξισώσεων από τις δύο μεθοδολογίες στα δεδομένα θερμοκρασίας από τα ERA5 Land κατά τις ημέρες που σημειώθηκε ακραία βροχόπτωση στο σταθμό παρατηρείται σημαντική βελτίωση. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε μείωση της υποεκτίμησης σε ποσοστό που κυμαίνεται από 10% έως >50% με την μεγαλύτερη βελτίωση να εντοπίζεται στις πιο ακραίες βροχοπτώσεις. Η βελτίωση είναι αντίστοιχη και με τα τρία μοντέλα (CC, CC+ και Binning) χωρίς να υπερτερεί κάποιο εξ αυτών.

Παρόμοια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τα αποτελέσματα του περιοχικού μοντέλου ICTP-RegCM4-6 για την ιστορική (1971-2000) και μελλοντική (2071-2100) περίοδο υπό το σενάριο μέγιστων εκπομπών RCP8.5. Η βελτίωση των ακραίων τιμών βροχόπτωσης του μοντέλου είναι αντίστοιχη αυτής των ERA5 Land για την ιστορική περίοδο. Τα αποτελέσματα είναι καλύτερα για τις πιο ακραίες τιμές όπου η υποεκτίμηση του μοντέλου είναι και η μέγιστη. Εφόσον η μέθοδος ήταν επιτυχής για την ιστορική περίοδο του μοντέλου, εφαρμόστηκε και στα δεδομένα βροχόπτωσης για την μελλοντική περίοδο. Με αυτόν τον τρόπο, κατά την μελλοντική περίοδο τα ακραία ύψη βροχής αναμένονται σημαντικά μεγαλύτερα από αυτά της αρχικής προβολής του μοντέλου. Παράλληλα, συγκρίνοντας τις δύο περιόδους, αναμένεται μετάβαση της μέγιστης συχνότητας των ακραίων σε υψηλότερες θερμοκρασίες κατά την περίοδο 2071-2100. Οι θερμοκρασίες αυτές ωστόσο είναι ίσες και χαμηλότερες από αυτές που παρατηρούνται από τα δεδομένα του σταθμού επομένως μπορεί να αναμένεται μετάβαση των ακραίων σε ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες, στις οποίες βάση της μεθόδου που αναπτύχθηκε τα αναμενόμενα ύψη βροχής είναι μεγαλύτερα. Η επικρατούσα ένταση των ακραίων επεισοδίων αναμένεται να εμφανίσει μείωση με βάση τα αρχικά δεδομένα του μοντέλου. Ωστόσο, μετά την εφαρμογή της διόρθωσης τα ύψη αναμένονται να μείνουν ίδια ή και να αυξηθούν ελαφρώς γεγονός που συμφωνεί με την θεωρία για αύξηση των υψών βροχής.

Η αντίστοιχη διαδικασία διόρθωσης των δεδομένων reanalysis, εφαρμόστηκε και σε προγνωστικά δεδομένα θερμοκρασίας του μοντέλου WRF του Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του ΑΠΘ για μία με τρεις ημέρες πριν από ακραία επεισόδια. Προέκυψε, ότι η μεθοδολογία είναι σε θέση να εκτιμήσει σε πολύ μεγάλο βαθμό τα ακραία ύψη ωριαίας βροχόπτωσης, καθιστώντας την ένα σημαντικό εργαλείο – δείκτη για την πρόβλεψη των ακραίων ακόμα και όταν τα προγνωστικά μοντέλα υποεκτιμούν την ακραία βροχόπτωση.

Εν κατακλείδι, η εφαρμογή των μεθόδων για τον καθορισμό της σχέσης ακραίων βροχοπτώσεων-θερμοκρασίας δείχνει ότι πράγματι οι ακραίες τιμές είναι σε συμφωνία με την σχέση Clausius-Clapeyron. Ταυτοχρόνως, ο ρυθμός που υπερβαίνει την CC, και έχει εντοπιστεί σε υπό-ημερήσια δεδομένα διαφόρων περιοχών, εντοπίζεται και στη



Θεσσαλονίκη. Επιπρόσθετα, σημαντικό στοιχείο είναι ότι η εφαρμογή της παρατηρούμενης σχέσης είναι σε θέση να οδηγήσει σε βελτίωση των υποεκτιμήσεων τόσο από τα δεδομένα reanalysis όσο και από τις προσομοιώσεις μοντέλων. Το τελευταίο, καθιστά την μέθοδο ένα ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο για την πρόληψη έναντι των ακραίων φαινομένων που μπορούν να οδηγήσουν σε πλημμυρικά φαινόμενα στο εγγύς και απώτερο μέλλον.



- Ali, E., & Cramer, W. (2023). Mediterranean Region. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability* (pp. 2233–2272). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.021>
- Ali, H., & Mishra, V. (2017). Contrasting response of rainfall extremes to increase in surface air and dewpoint temperatures at urban locations in India. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01306-1>
- Allen, M. R., & Ingram, W. J. (2002). Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. In *Nature* (Vol. 419, Issue 6903). <https://doi.org/10.1038/nature01092>
- Berg, P., Moseley, C., & Haerter, J. O. (2013). Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures. *Nature Geoscience*, 6(3). <https://doi.org/10.1038/ngeo1731>
- Bisselink, B., & Dolman, A. J. (2008). Precipitation recycling: Moisture sources over Europe using ERA-40 data. *Journal of Hydrometeorology*, 9(5). <https://doi.org/10.1175/2008JHM962.1>
- Bolton, D. (1980). The computation of equivalent potential temperature. *Monthly Weather Review*, 108(7). [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2)
- Chen, C., Guerit, L., Foreman, B. Z., Hassenruck-Gudipati, H. J., Adatte, T., Honegger, L., Perret, M., Sluijs, A., & Castelltort, S. (2018). Estimating regional flood discharge during Palaeocene-Eocene global warming. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31076-3>
- Cherif, S., Doblas-Miranda, E., & Lionello, P. (2020). Drivers of change. In *Climate and environmental change in the Mediterranean basin – Current situation and risks for the future. First Mediterranean assessment report, Union for the Mediterranean*.



Diakakis, M., & Deligiannakis, G. (2017). Flood fatalities in Greece: 1970–2010. *Journal of Flood Risk Management*, 10(1). <https://doi.org/10.1111/jfr3.12166>

Diakakis, M., Mavroulis, S., & Deligiannakis, G. (2012). Floods in Greece, a statistical and spatial approach. *Natural Hazards*, 62(2). <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0090-z>

Diakakis, M., Papagiannaki, K., & Fouskaris, M. (2023). The Occurrence of Catastrophic Multiple-Fatality Flash Floods in the Eastern Mediterranean Region. *Water (Switzerland)*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/w15010119>

Donat, M. G., Lowry, A. L., Alexander, L. V., O’Gorman, P. A., & Maher, N. (2016). More extreme precipitation in the world’s dry and wet regions. *Nature Climate Change*, 6(5). <https://doi.org/10.1038/nclimate2941>

Drobinski, P., Silva, N. Da, Panthou, G., Bastin, S., Muller, C., Ahrens, B., Borga, M., Conte, D., Fosser, G., Giorgi, F., Güttler, I., Kotroni, V., Li, L., Morin, E., Öñol, B., Quintana-Segui, P., Romera, R., & Torma, C. Z. (2018). Scaling precipitation extremes with temperature in the Mediterranean: past climate assessment and projection in anthropogenic scenarios. *Climate Dynamics*, 51(3), 1237–1257. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3083-x>

Feidas, H., Nouloupoulou, C., Makrogiannis, T., & Bora-Senta, E. (2007). Trend analysis of precipitation time series in Greece and their relationship with circulation using surface and satellite data: 1955-2001. *Theoretical and Applied Climatology*, 87(1–4). <https://doi.org/10.1007/s00704-006-0200-5>

Gaume, E., Borga, M., Llasat, M. C., Maouche, S., Lang, M., & Diakakis, M. (2018). Subchapter 1.3.4. Mediterranean extreme floods and flash floods. In *The Mediterranean region under climate change*. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.23181>

Giorgi, F., Raffaele, F., & Coppola, E. (2019). The response of precipitation characteristics to global warming from climate projections. *Earth System Dynamics*, 10(1). <https://doi.org/10.5194/esd-10-73-2019>



Gomis-Cebolla, J., Rattayova, V., Salazar-Galán, S., & Francés, F. (2023). Evaluation of ERA5 and ERA5-Land reanalysis precipitation datasets over Spain (1951–2020). *Atmospheric Research*, 284. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106606>

Grillakis, M. G., & Koutroulis, A. G. (2018). *Hydrometeorological Extremes in a Warmer Climate: A Local Scale Assessment for the Island of Crete*. <https://doi.org/10.3390/ecws-3-05818>

IPCC. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]*. IPCC, Geneva, Switzerland. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

Jiang, Q., Li, W., Fan, Z., He, X., Sun, W., Chen, S., Wen, J., Gao, J., & Wang, J. (2021). Evaluation of the ERA5 reanalysis precipitation dataset over Chinese Mainland. *Journal of Hydrology*, 595. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125660>

Lavers, D. A., Simmons, A., Vamborg, F., & Rodwell, M. J. (2022). An evaluation of ERA5 precipitation for climate monitoring. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148(748). <https://doi.org/10.1002/qj.4351>

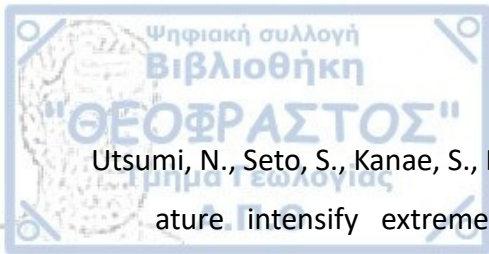
Lenderink, G., Barbero, R., Loriaux, J. M., & Fowler, H. J. (2017). Super-Clausius-Clapeyron scaling of extreme hourly convective precipitation and its relation to large-scale atmospheric conditions. *Journal of Climate*, 30(15). <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0808.1>

Lenderink, G., & Van Meijgaard, E. (2008). Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nature Geoscience*, 1(8). <https://doi.org/10.1038/ngeo262>

Lionello, P., & Scarascia, L. (2020). The relation of climate extremes with global warming in the Mediterranean region and its north versus south contrast. *Regional Environmental Change*, 20(1). <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01610-z>

- Madsen, H., Lawrence, D., Lang, M., Martinkova, M., & Kjeldsen, T. R. (2014). Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *Journal of Hydrology*, 519(PD). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.003>
- Manola, I., Van Den Hurk, B., De Moel, H., & Aerts, J. C. J. H. (2018). Future extreme precipitation intensities based on a historic event. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(7). <https://doi.org/10.5194/hess-22-3777-2018>
- Martinkova, M., & Kysely, J. (2020). Overview of observed clausius-clapeyron scaling of extreme precipitation in midlatitudes. In *Atmosphere* (Vol. 11, Issue 8). <https://doi.org/10.3390/ATMOS11080786>
- Molnar, P., Fatichi, S., Gaál, L., Szolgay, J., & Burlando, P. (2015). Storm type effects on super Clausius-Clapeyron scaling of intense rainstorm properties with air temperature. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(4). <https://doi.org/10.5194/hess-19-1753-2015>
- Nastos, P., & Zerefos, C. (2010). Climate change and precipitation in Greece. *Hellenic Journal of Geosciences*, 45(1), 185–192.
- Pakalidou, N., & Karacosta, P. (2018). Study of very long-period extreme precipitation records in Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Research*, 208. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.07.029>
- Pakalidou, N., Karacosta, P., & Douka, M. (2021). Associating short-duration precipitation extreme events with land surface temperature in Thessaloniki. *COMECAP2021*.
- Pall, P., Allen, M. R., & Stone, D. A. (2007). Testing the Clausius-Clapeyron constraint on changes in extreme precipitation under CO₂ warming. *Climate Dynamics*, 28(4). <https://doi.org/10.1007/s00382-006-0180-2>
- Papadopoulos-Zachos, A. (2020). *STUDY OF THE EXTREME PRECIPITATION INDICES IN THE GREEK AREA*. Aristotle University of Thessaloniki, School of Geology.

- Papagiannaki, K., Lagouvardos, K., & Kotroni, V. (2013). A database of high-impact weather events in Greece: A descriptive impact analysis for the period 2001-2011. *Natural Hazards and Earth System Science*, 13(3). <https://doi.org/10.5194/nhess-13-727-2013>
- Pereira, S., Diakakis, M., Deligiannakis, G., & Zêzere, J. L. (2017). Comparing flood mortality in Portugal and Greece (Western and Eastern Mediterranean). *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.03.007>
- Philandras, C. M., Nastos, P. T., Kapsomenakis, J., Douvis, K. C., Tselioudis, G., & Zerefos, C. S. (2011). Long term precipitation trends and variability within the Mediterranean region. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(12). <https://doi.org/10.5194/nhess-11-3235-2011>
- Schroeer, K., & Kirchengast, G. (2018). Sensitivity of extreme precipitation to temperature: the variability of scaling factors from a regional to local perspective. *Climate Dynamics*, 50(11–12). <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3857-9>
- Tang, J., Lu, Y., Wang, S., Guo, Z., Lu, Y., & Fang, J. (2023). Projection of Hourly Extreme Precipitation Using the WRF Model Over Eastern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(1). <https://doi.org/10.1029/2022JD036448>
- Tolika, K., Maheras, P., & Anagnostopoulou, C. (2018). The exceptionally wet year of 2014 over Greece: a statistical and synoptical-atmospheric analysis over the region of Thessaloniki. *Theoretical and Applied Climatology*, 132(3–4). <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2131-8>
- Tramblay, Y., & Somot, S. (2018). Future evolution of extreme precipitation in the Mediterranean. *Climatic Change*, 151(2). <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2300-5>
- Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1–2). <https://doi.org/10.3354/cr00953>



Utsumi, N., Seto, S., Kanae, S., Maeda, E. E., & Oki, T. (2011). Does higher surface temperature intensify extreme precipitation? *Geophysical Research Letters*, 38(16).
<https://doi.org/10.1029/2011GL048426>

Van de Vyver, H., Van Schaeybroeck, B., De Troch, R., Hamdi, R., & Termonia, P. (2019). Modeling the Scaling of Short-Duration Precipitation Extremes With Temperature. *Earth and Space Science*, 6(10). <https://doi.org/10.1029/2019EA000665>

Zhang, W., Villarini, G., & Wehner, M. (2019). Contrasting the responses of extreme precipitation to changes in surface air and dew point temperatures. *Climatic Change*.
<https://doi.org/10.1007/s10584-019-02415-8>

Zittis, G., Bruggeman, A., & Lelieveld, J. (2021). Revisiting future extreme precipitation trends in the Mediterranean. *Weather and Climate Extremes*, 34.
<https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100380>





ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ QUANTILE REGRESSION

ΩΡΙΑΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Πίνακας Π.1: Αποτελέσματα του μοντέλου CC της μεθοδολογίας Quantile Regression για την μέση ημερήσια θερμοκρασία και σημείο δρόσου για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια ($90^\circ, 95^\circ, 99^\circ$ και $99,9^\circ$). Δίνονται οι παράμετροι της ευθείας α και β (κλίση της ευθείας που αντιστοιχεί στον ρυθμό μεταβολής των ποσοστημορίων της βροχόπτωσης με τη θερμοκρασία), η τιμή του Bayesian Information Criterion (BIC) και η τιμή R του Goodness of Fit Criterion.

CC Model (1951-2021)				
Θερμοκρασία 2m				
CC model	alpha	beta (%/C)	BIC	R (%)
tau=0.9	0.205	5.4	118106	3.8
tau=0.95	0.569	5.9	123785	5.3
tau=0.99	1.06	7.7	134627	9.2
tau=0.999	1.642	8.3	146171	11.6
Σημείο Δρόσου				
CC model	alpha	beta (%/C)	BIC	R (%)
tau=0.9	0.46	4.9	112946	2.8
tau=0.95	0.853	5.5	118428	4.1
tau=0.99	1.426	6.8	129107	7.4
tau=0.999	2.227	7.2	141339	8

Πίνακας Π.2: Αποτελέσματα του μοντέλου CC της μεθοδολογίας Quantile Regression για την μέση ημερήσια θερμοκρασία και σημείο δρόσου για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια ($90^\circ, 95^\circ, 99^\circ$ και $99,9^\circ$). Οι παράμετροι α_1, β_1 αντιστοιχούν στην πρώτη ευθεία και α_2, β_2 στην δεύτερη. Επιπλέον δίνεται ο λόγος των κλίσεων των δύο ευθειών β_2/β_1 , το θερμοκρασιακό όριο που χωρίζει τις δύο ευθείες (T_c) και οι τιμές BIC και R(%) για τον καθορισμό του κατάλληλου μοντέλου.

CC+ Model (1951-2021)								
Θερμοκρασία 2m								
CC+ model	alpha1	alpha2	beta1 (%/C)	beta2 (%/C)	beta2/beta1	Tc (C)	BIC	R (%)
tau=0.9	0.328	0.123	3.4	5.9	1.8	8.1	118098	3.8
tau=0.95	0.676	0.397	4	7	1.7	9.3	123743	5.4
tau=0.99	1.119	0.68	6.8	9.9	1.5	14.1	134597	9.3
tau=0.999	2.12	1.237	1.2	10.5	8.5	9.5	145627	12.4
Σημείο Δρόσου								
CC+ model	alpha1	alpha2	beta1 (%/C)	beta2 (%/C)	beta2/beta1	Tc (C)	BIC	R (%)
tau=0.9	0.527	0.24	1.3	6.9	5.4	5.1	112772	3.1
tau=0.95	0.889	0.577	2	7.9	3.9	5.3	118221	4.5
tau=0.99	1.48	1.113	4.1	9.7	2.4	6.5	128798	7
tau=0.999	2.259	1.234	1.6	14.2	9	8.1	140311	9.5

ΧΕΙΜΕΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ

Πίνακας Π.3: Αποτελέσματα του μοντέλου CC της μεθοδολογίας Quantile Regression για την μέση ημερήσια θερμοκρασία και σημείο δρόσου για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια (90° , 95° , 99° και $99,9^{\circ}$) κατά το χειμερινό εξάμηνο (Οκτώβριος-Μάρτιος). Δίνονται οι παράμετροι της ευθείας α και β (κλίση της ευθείας που αντιστοιχεί στον ρυθμό μεταβολής των ποσοστημορίων της βροχόπτωσης με τη θερμοκρασία), η τιμή του Bayesian Information Criterion (BIC) και η τιμή R του Goodness of Fit Criterion.

CC Model (Οκτώβριος-Μάρτιος)				
Θερμοκρασία 2m				
percentile	alpha	beta (%/C)	BIC	R (%)
tau=0.9	0.25	4.8	78824	1.5
tau=0.95	0.621	5.2	82688	2.6
tau=0.99	1.1	7.2	90069	4.1
tau=0.999	1.81	6.6	98088	6.2
Σημείο Δρόσου				
percentile	alpha	beta (%/C)	BIC	R (%)
tau=0.9	0.456	3.7	75082	1.3
tau=0.95	0.849	4.2	78736	2.3
tau=0.99	1.396	5.8	85781	3.5
tau=0.999	2.042	6.4	93601	5.5

Πίνακας Π.4: Αποτελέσματα του μοντέλου CC της μεθοδολογίας Quantile Regression για την μέση ημερήσια θερμοκρασία και σημείο δρόσου για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια (90° , 95° , 99° και $99,9^{\circ}$) κατά την χειμερινή περίοδο (Οκτώβριος-Μάρτιος). Οι παράμετροι α_1, β_1 αντιστοιχούν στην πρώτη ευθεία και α_2, β_2 στην δεύτερη. Επιπλέον δίνεται ο λόγος των κλίσεων των δύο ευθειών β_2/β_1 , το θερμοκρασιακό όριο που χωρίζει τις δύο ευθείες (T_c) και οι τιμές BIC και R(%) για τον καθορισμό του κατάλληλου μοντέλου.

CC+ Model (Οκτώβριος-Μάρτιος)								
Θερμοκρασία 2m								
percentile	alpha1	alpha2	beta1 (%/C)	beta2 (%/C)	beta2/beta1	Tc (C)	BIC	R (%)
tau=0.9	0.32	0.154	3.5	5.5	1.6	8	78833	1.5
tau=0.95	0.67	0.52	4.1	6	1.5	8	82691	2.6
tau=0.99	1.123	-0.318	6.8	15.8	2.3	16.1	90052	4.2
tau=0.999	2.117	1.207	1.3	10.7	8.2	9.7	97746	7
Σημείο Δρόσου								
percentile	alpha1	alpha2	beta1 (%/C)	beta2 (%/C)	beta2/beta1	Tc (C)	BIC	R (%)
tau=0.9	0.475	0.27	1.7	5.8	3.3	5.1	75045	1.4
tau=0.95	0.86	0.689	2.5	5.9	2.4	5.1	78698	2.4
tau=0.99	1.386	-0.781	5.7	21.3	3.7	13.9	85753	3.6
tau=0.999	2.104	1.263	2.7	13.5	5.1	7.8	93247	6.4

ΘΕΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ

Πίνακας Π.5: Αποτελέσματα του μοντέλου CC της μεθοδολογίας Quantile Regression για την μέση ημερήσια θερμοκρασία και σημείο δρόσου για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια (90°, 95°, 99° και 99,9°) κατά το θερινό εξάμηνο (Απρίλιος-Σεπτέμβριος). Δίνονται οι παράμετροι της ευθείας α και β (κλίση της ευθείας που αντιστοιχεί στον ρυθμό μεταβολής των ποσοστημορίων της βροχόπτωσης με τη θερμοκρασία), η τιμή του Bayesian Information Criterion (BIC) και η τιμή R του Goodness of Fit Criterion.

CC Model (Απρίλιος-Σεπτέμβριος)				
Θερμοκρασία 2m				
percentile	alpha	beta (%/C)	BIC	R (%)
tau=0.9	0.173	5.7	39162	2.2
tau=0.95	0.459	6.7	40953	3.6
tau=0.99	0.892	8.7	44407	5.3
tau=0.999	0.855	12.3	47746	6.4
Σημείο Δρόσου				
percentile	alpha	beta (%/C)	BIC	R (%)
tau=0.9	0.738	3.9	37501	1.2
tau=0.95	1.078	4.7	39281	2.1
tau=0.99	1.776	5.4	42752	2.9
tau=0.999	2.406	7.2	46471	2

Πίνακας Π.6: Αποτελέσματα του μοντέλου CC της μεθοδολογίας Quantile Regression για την μέση ημερήσια θερμοκρασία και σημείο δρόσου για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια (90°, 95°, 99° και 99,9°) κατά την θερινή περίοδο (Απρίλιος-Σεπτέμβριος). Οι παράμετροι α_1, β_1 αντιστοιχούν στην πρώτη ευθεία και α_2, β_2 στην δεύτερη. Επιπλέον δίνεται ο λόγος των κλίσεων των δύο ευθειών β_2/β_1 , το θερμοκρασιακό όριο που χωρίζει τις δύο ευθείες (T_c) και οι τιμές BIC και R(%) για τον καθορισμό του κατάλληλου μοντέλου.

CC+ Model (Απρίλιος-Σεπτέμβριος)								
Θερμοκρασία 2m								
percentile	alpha1	alpha2	beta1 (%/C)	beta2 (%/C)	beta2/beta1	Tc (C)	BIC	R (%)
tau=0.9	0.35	0.067	4.3	6.2	1.4	15.1	39176	2.3
tau=0.95	0.679	0.3	5	7.5	1.5	15.1	40961	3.6
tau=0.99	0.757	1.506	9.9	5.6	0.6	17.7	44406	5.4
tau=0.999	0.838	1.952	13.3	7.3	0.5	18.5	47543	7.4
Σημείο Δρόσου								
percentile	alpha1	alpha2	beta1 (%/C)	beta2 (%/C)	beta2/beta1	Tc (C)	BIC	R (%)
tau=0.9	0.853	0.303	1.3	6.8	5.3	9.9	37473	1.5
tau=0.95	1.244	0.547	1.7	8.7	5.2	9.9	39222	2.5
tau=0.99	1.848	1.255	3	8.9	3	10	42682	3.3
tau=0.999	3.07	1.566	1.2	11.9	9.7	14	46209	3.4

ΤΡΙΩΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Πίνακας Π.7: Αποτελέσματα του μοντέλου CC της μεθοδολογίας Quantile Regression για την μέση ημερήσια θερμοκρασία και σημείο δρόσου για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια (90^ο, 95^ο, 99^ο και 99,9^ο) της τριώρης έντασης βροχόπτωσης. Δίνονται οι παράμετροι της ευθείας α και β (κλίση της ευθείας που αντιστοιχεί στον ρυθμό μεταβολής των ποσοστημορίων της βροχόπτωσης με τη θερμοκρασία), η τιμή του Bayesian Information Criterion (BIC) και η τιμή R του Goodness of Fit Criterion.

CC Model (1951-2021)				
Θερμοκρασία 2m				
CC model	alpha	beta (%/C)	BIC	R (%)
tau=0.9	1.103	3.8	65810	1.7
tau=0.95	1.445	4.4	68233	2.8
tau=0.99	1.966	5.7	73113	5.1
tau=0.999	2.486	5.9	77353	8.1
Σημείο Δρόσου				
CC model	alpha	beta (%/C)	BIC	R (%)
tau=0.9	1.277	3.6	62592	1.3
tau=0.95	1.633	4.2	64852	2.4
tau=0.99	2.286	4.9	69603	4.1
tau=0.999	2.762	6.1	74227	5.7

Πίνακας Π.8: Αποτελέσματα του μοντέλου CC της μεθοδολογίας Quantile Regression για την μέση ημερήσια θερμοκρασία και σημείο δρόσου για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια (90^ο, 95^ο, 99^ο και 99,9^ο) της τριώρης έντασης βροχόπτωσης. Οι παράμετροι α1, β1 αντιστοιχούν στην πρώτη ευθεία και α2, β2 στην δεύτερη. Επιπλέον δίνεται ο λόγος των κλίσεων των δύο ευθειών β2/β1, το θερμοκρασιακό όριο που χωρίζει τις δύο ευθείες (Tc) και οι τιμές BIC και R(%) για τον καθορισμό του κατάλληλου μοντέλου.

CC+ Model (1951-2021)								
Θερμοκρασία 2m								
CC+ model	alpha1	alpha2	beta1 (%/C)	beta2 (%/C)	beta2/beta1	Tc (C)	BIC	R (%)
tau=0.9	1.078	1.37	4.1	2.5	0.6	19	65824	1.7
tau=0.95	1.552	1.314	2.5	5.1	2.1	8.9	68235	2.9
tau=0.99	2.008	1.818	5.1	6.5	1.3	13.6	73125	5.1
tau=0.999	2.46	2.814	6.2	4.4	0.7	18.7	77334	8.2
Σημείο Δρόσου								
CC+ model	alpha1	alpha2	beta1 (%/C)	beta2 (%/C)	beta2/beta1	Tc (C)	BIC	R (%)
tau=0.9	1.317	1.111	1.1	5	4.6	5.2	62568	1.5
tau=0.95	1.684	1.454	1.4	5.8	4.2	5.2	64796	2.6
tau=0.99	2.278	2.062	3.7	6.7	1.8	7.1	69565	4.2
tau=0.999	2.779	2.347	4	9.1	2.3	8.4	74060	6

ΧΕΙΜΕΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ

Πίνακας Π.9: Αποτελέσματα του μοντέλου CC της μεθοδολογίας Quantile Regression για την μέση ημερήσια θερμοκρασία και σημείο δρόσου για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια (90°, 95°, 99° και 99,9°) της τρίωρης έντασης βροχόπτωσης κατά το χειμερινό εξάμηνο (Οκτώβριος-Μάρτιος). Δίνονται οι παράμετροι της ευθείας α και β (κλίση της ευθείας που αντιστοιχεί στον ρυθμό μεταβολής των ποσοστημορίων της βροχόπτωσης με τη θερμοκρασία), η τιμή του Bayesian Information Criterion (BIC) και η τιμή R του Goodness of Fit Criterion.

CC Model (Οκτώβριος-Μάρτιος)				
Θερμοκρασία 2m				
percentile	alpha	beta (%/C)	BIC	R (%)
tau=0.9	1.12	3.3	42209	0.7
tau=0.95	1.478	3.8	43853	1.1
tau=0.99	1.996	5.5	47031	2.3
tau=0.999	2.538	5.3	49924	2.9
Σημείο Δρόσου				
percentile	alpha	beta (%/C)	BIC	R (%)
tau=0.9	1.264	2.7	40038	0.7
tau=0.95	1.616	3.5	41550	1.1
tau=0.99	2.242	4.2	44524	2.4
tau=0.999	2.762	4.8	47250	3

Πίνακας Π.10: Αποτελέσματα του μοντέλου CC της μεθοδολογίας Quantile Regression για την μέση ημερήσια θερμοκρασία και σημείο δρόσου για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια (90°, 95°, 99° και 99,9°) της τρίωρης έντασης βροχόπτωσης κατά την χειμερινή περίοδο (Οκτώβριος-Μάρτιος). Οι παράμετροι α_1, β_1 αντιστοιχούν στην πρώτη ευθεία και α_2, β_2 στην δεύτερη. Επιπλέον δίνεται ο λόγος των κλίσεων των δύο ευθειών β_2/β_1 , το θερμοκρασιακό όριο που χωρίζει τις δύο ευθείες (T_c) και οι τιμές BIC και R(%) για τον καθορισμό του κατάλληλου μοντέλου.

CC+ Model (Οκτώβριος-Μάρτιος)								
Θερμοκρασία 2m								
percentile	alpha1	alpha2	beta1 (%/C)	beta2 (%/C)	beta2/beta1	T _c (C)	BIC	R (%)
tau=0.9	1.108	1.348	3.4	1.9	0.5	15.1	42227	0.7
tau=0.95	1.543	1.305	2.6	5.1	2	9.3	43862	1.1
tau=0.99	1.962	2.098	6.6	4.6	0.7	6.8	47045	2.3
tau=0.999	2.445	2.708	6.5	4.2	0.6	11.5	49916	3
Σημείο Δρόσου								
percentile	alpha1	alpha2	beta1 (%/C)	beta2 (%/C)	beta2/beta1	T _c (C)	BIC	R (%)
tau=0.9	1.28	1.126	1.2	4.2	3.5	5.2	40043	0.7
tau=0.95	1.65	1.461	1.5	5.2	3.5	5.1	41544	1.3
tau=0.99	2.239	1.911	4	7.1	1.8	10.6	44529	2.5
tau=0.999	2.767	2.702	4.3	5.2	1.2	7	47247	3.6

ΘΕΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ

Πίνακας Π.11: Αποτελέσματα του μοντέλου CC της μεθοδολογίας Quantile Regression για την μέση ημερήσια θερμοκρασία και σημείο δρόσου για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια (90°, 95°, 99° και 99,9°) της τρίωρης έντασης βροχόπτωσης κατά το θερινό εξάμηνο (Απρίλιος-Σεπτέμβριος). Δίνονται οι παράμετροι της ευθείας α και β (κλίση της ευθείας που αντιστοιχεί στον ρυθμό μεταβολής των ποσοστημορίων της βροχόπτωσης με τη θερμοκρασία), η τιμή του Bayesian Information Criterion (BIC) και η τιμή R του Goodness of Fit Criterion.

CC Model (Απρίλιος-Σεπτέμβριος)				
Θερμοκρασία 2m				
percentile	alpha	beta (%/C)	BIC	R (%)
tau=0.9	1.273	3.1	23556	0.7
tau=0.95	1.471	4.4	24353	1.4
tau=0.99	1.873	6.2	26057	3.2
tau=0.999	2.682	5	27361	4.9
Σημείο Δρόσου				
percentile	alpha	beta (%/C)	BIC	R (%)
tau=0.9	1.535	2.5	22430	0.5
tau=0.95	1.877	3	23186	0.9
tau=0.99	2.414	4.6	24910	1.8
tau=0.999	3.388	2.9	26404	2.4

Πίνακας Π.12: Αποτελέσματα του μοντέλου CC της μεθοδολογίας Quantile Regression για την μέση ημερήσια θερμοκρασία και σημείο δρόσου για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια (90°, 95°, 99° και 99,9°) της τρίωρης έντασης βροχόπτωσης κατά την θερινή περίοδο (Απρίλιος-Σεπτέμβριος). Οι παράμετροι α_1, β_1 αντιστοιχούν στην πρώτη ευθεία και α_2, β_2 στην δεύτερη. Επιπλέον δίνεται ο λόγος των κλίσεων των δύο ευθειών β_2/β_1 , το θερμοκρασιακό όριο που χωρίζει τις δύο ευθείες (T_c) και οι τιμές BIC και R(%) για τον καθορισμό του κατάλληλου μοντέλου.

CC+ Model (Απρίλιος-Σεπτέμβριος)								
Θερμοκρασία 2m								
percentile	alpha1	alpha2	beta1 (%/C)	beta2 (%/C)	beta2/beta1	Tc (C)	BIC	R (%)
tau=0.9	1.176	1.519	4	2	0.5	17.3	23571	0.7
tau=0.95	1.265	1.768	5.9	3	0.5	17.3	24357	1.5
tau=0.99	1.802	2.247	6.7	4.4	0.7	19	26062	3.3
tau=0.999	2.237	2.827	7.6	4.3	0.6	18.2	27362	5
Σημείο Δρόσου								
percentile	alpha1	alpha2	beta1 (%/C)	beta2 (%/C)	beta2/beta1	Tc (C)	BIC	R (%)
tau=0.9	1.631	1.344	1.1	3.8	3.6	10.4	22441	0.5
tau=0.95	1.946	1.63	1.7	4.8	2.7	10.4	23191	1
tau=0.99	2.475	2.24	3.5	5.8	1.6	10.4	24915	1.9
tau=0.999	3.493	2.732	1.3	7.1	5.3	13.2	26321	3.3

ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ QUANTILE REGRESSION ΓΙΑ ΣΗΜΕΙΟ ΔΡΟΣΟΥ

ΩΡΙΑΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Πίνακας Π.13: Ρυθμός αύξησης των ανώτερων ποσοστημορίων της ωριαίας βροχόπτωσης με το σημείο δρόσου για την εκάστοτε περίοδο και ποσοστημόριο από τα δύο μοντέλα (CC, CC+) της μεθόδου Quantile Regression, όπως καθορίζεται από την κλίση θ (CC) και θ_1, θ_2 (CC+) των ευθειών. Για το μοντέλο CC+ δίνεται το θερμοκρασιακό όριο (T_c) κάθε ποσοστημορίου. Σημειωμένο με γκρι, είναι το καλύτερο μοντέλο σύμφωνα με την μέθοδο BIC. Τονίζονται οι τιμές που υπερβαίνουν τον ρυθμό CC.

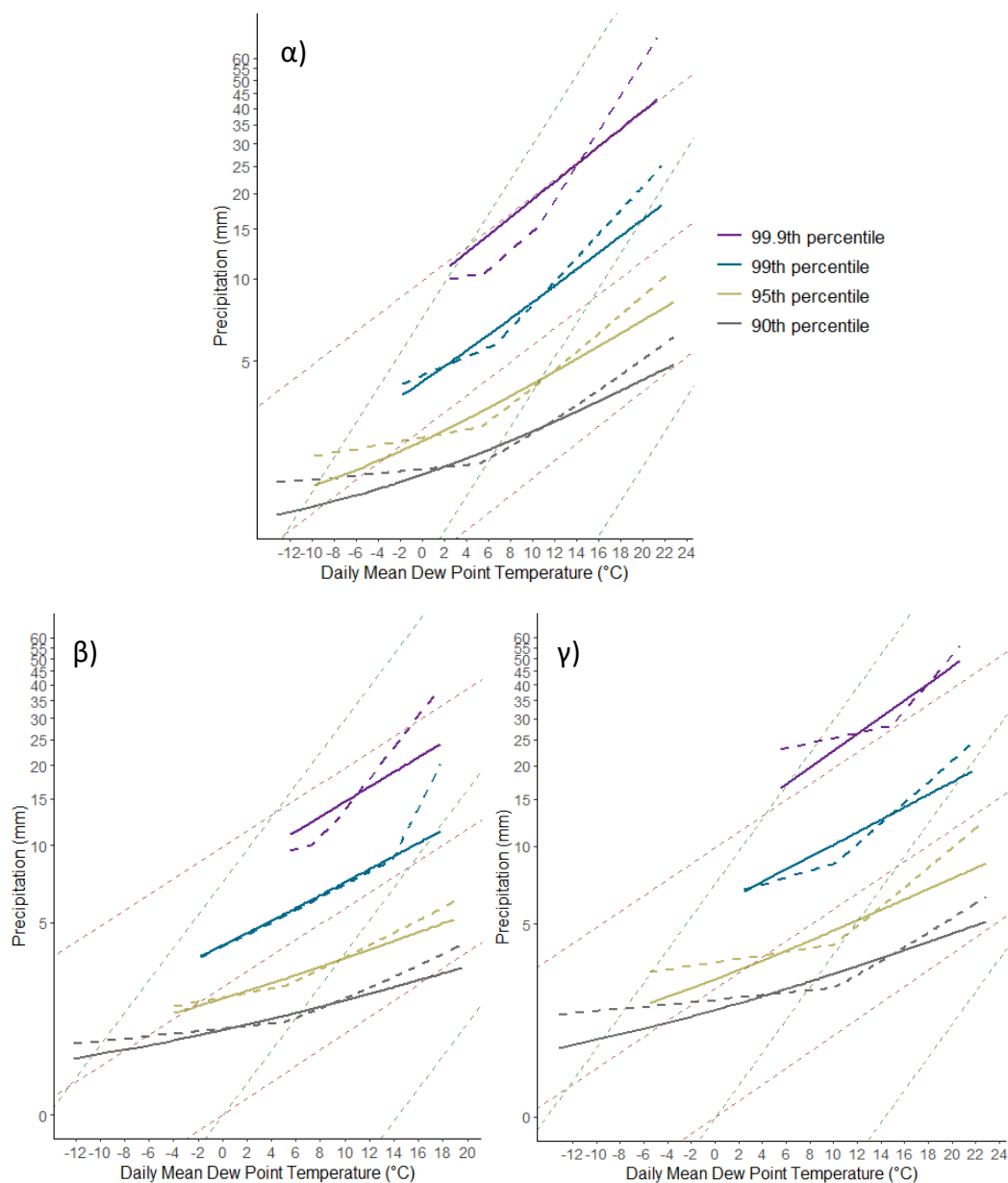
	P90				P95				P99				P99.9			
	CC	CC+			CC	CC+			CC	CC+			CC	CC+		
	θ	θ_1	θ_2	$T_c (^{\circ}C)$	θ	θ_1	θ_2	$T_c (^{\circ}C)$	θ	θ_1	θ_2	$T_c (^{\circ}C)$	θ	θ_1	θ_2	$T_c (^{\circ}C)$
1951-2021	4,9	1,3	6,9	5,1	5,5	2	7,9	5,3	6,8	4,1	9,7	6,5	7,2	1,6	14,2	8,1
1951-2021 Χειμερινό εξάμηνο	3,7	1,7	5,8	5,1	4,2	2,5	5,9	5,1	5,8	5,7	21,3	13,9	6,4	2,7	13,5	7,8
1951-2021 Θερινό εξάμηνο	3,9	1,3	6,8	9,9	4,7	1,7	8,7	9,9	5,4	3	8,9	10	7,2	1,2	11,9	14

ΤΡΙΩΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

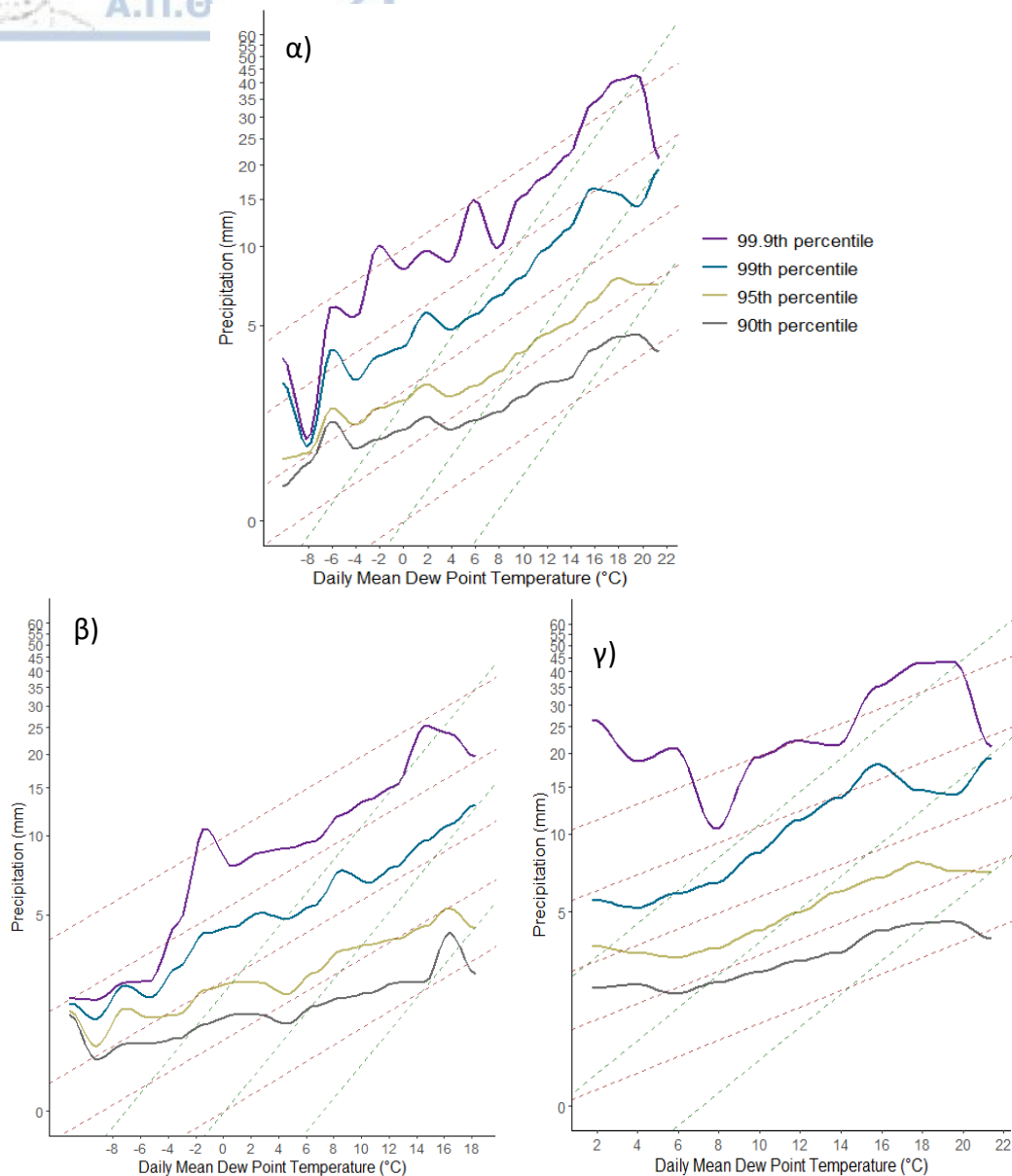
Πίνακας Π.14: Ρυθμός αύξησης των ανώτερων ποσοστημορίων της τριώρης έντασης βροχόπτωσης με το σημείο δρόσου για την εκάστοτε περίοδο και ποσοστημόριο από τα δύο μοντέλα (CC, CC+) της μεθόδου Quantile Regression, όπως καθορίζεται από την κλίση θ (CC) και θ_1, θ_2 (CC+) των ευθειών. Για το μοντέλο CC+ δίνεται το θερμοκρασιακό όριο (T_c) κάθε ποσοστημορίου. Σημειωμένο με γκρι, είναι το καλύτερο μοντέλο σύμφωνα με την μέθοδο BIC. Τονίζονται οι τιμές που υπερβαίνουν τον ρυθμό CC.

	P90				P95				P99				P99.9			
	CC	CC+			CC	CC+			CC	CC+			CC	CC+		
	θ	θ_1	θ_2	$T_c (^{\circ}C)$	θ	θ_1	θ_2	$T_c (^{\circ}C)$	θ	θ_1	θ_2	$T_c (^{\circ}C)$	θ	θ_1	θ_2	$T_c (^{\circ}C)$
1951-2021	3,6	1,1	5	5,2	4,2	1,4	5,8	5,2	4,9	3,7	6,7	7,1	6,1	4	9,1	8,4
1951-2021 Χειμερινό εξάμηνο	2,7	1,2	4,2	5,2	3,5	1,5	5,2	5,1	4,2	4	7,1	10,6	4,8	4,3	5,2	7
1951-2021 Θερινό εξάμηνο	2,5	1,1	3,8	10,4	3	1,7	4,8	10,4	4,6	3,5	5,8	10,4	2,9	1,3	7,1	13,2

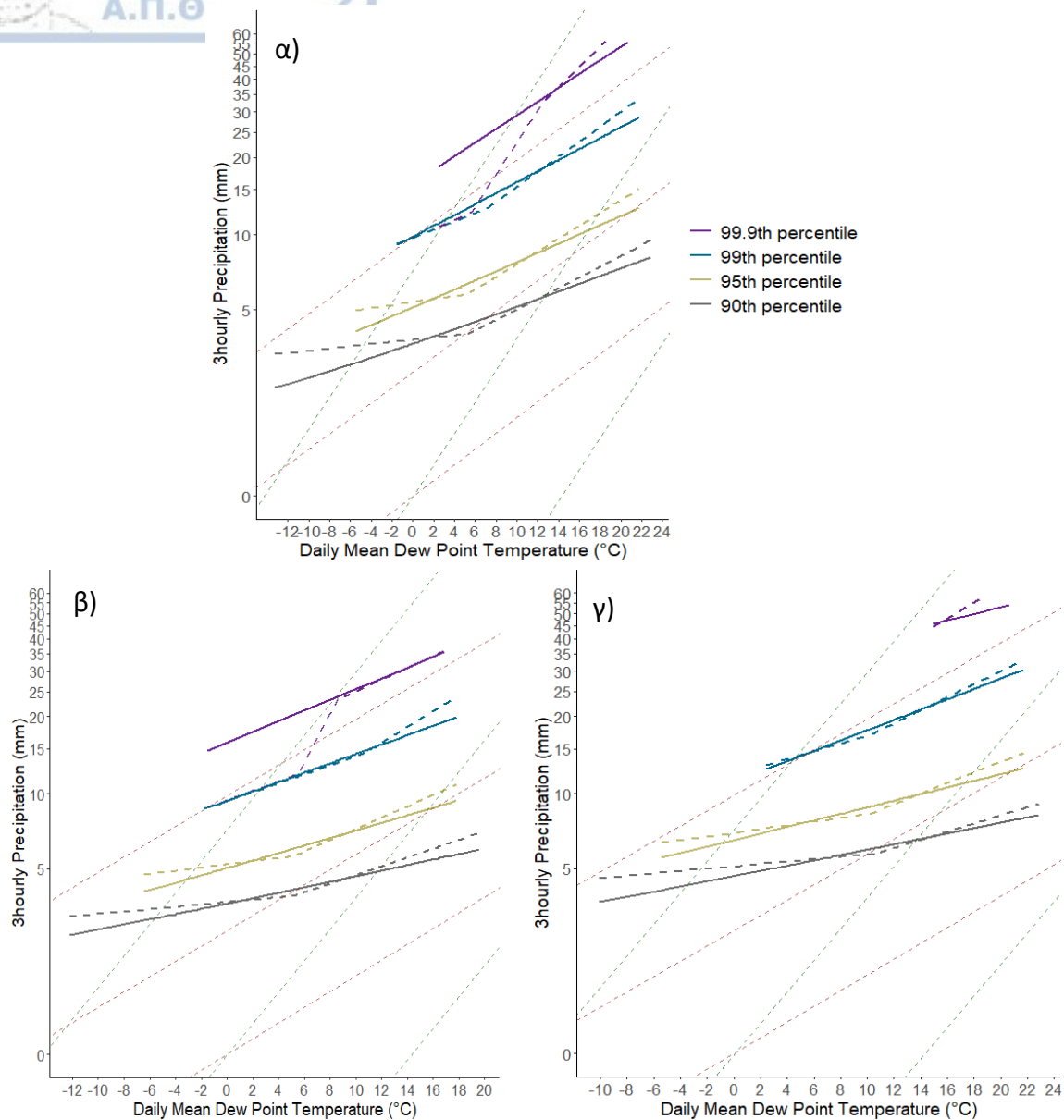
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ QUANTILE REGRESSION ΚΑΙ BINNING ΓΙΑ ΣΗΜΕΙΟ ΔΡΟΣΟΥ



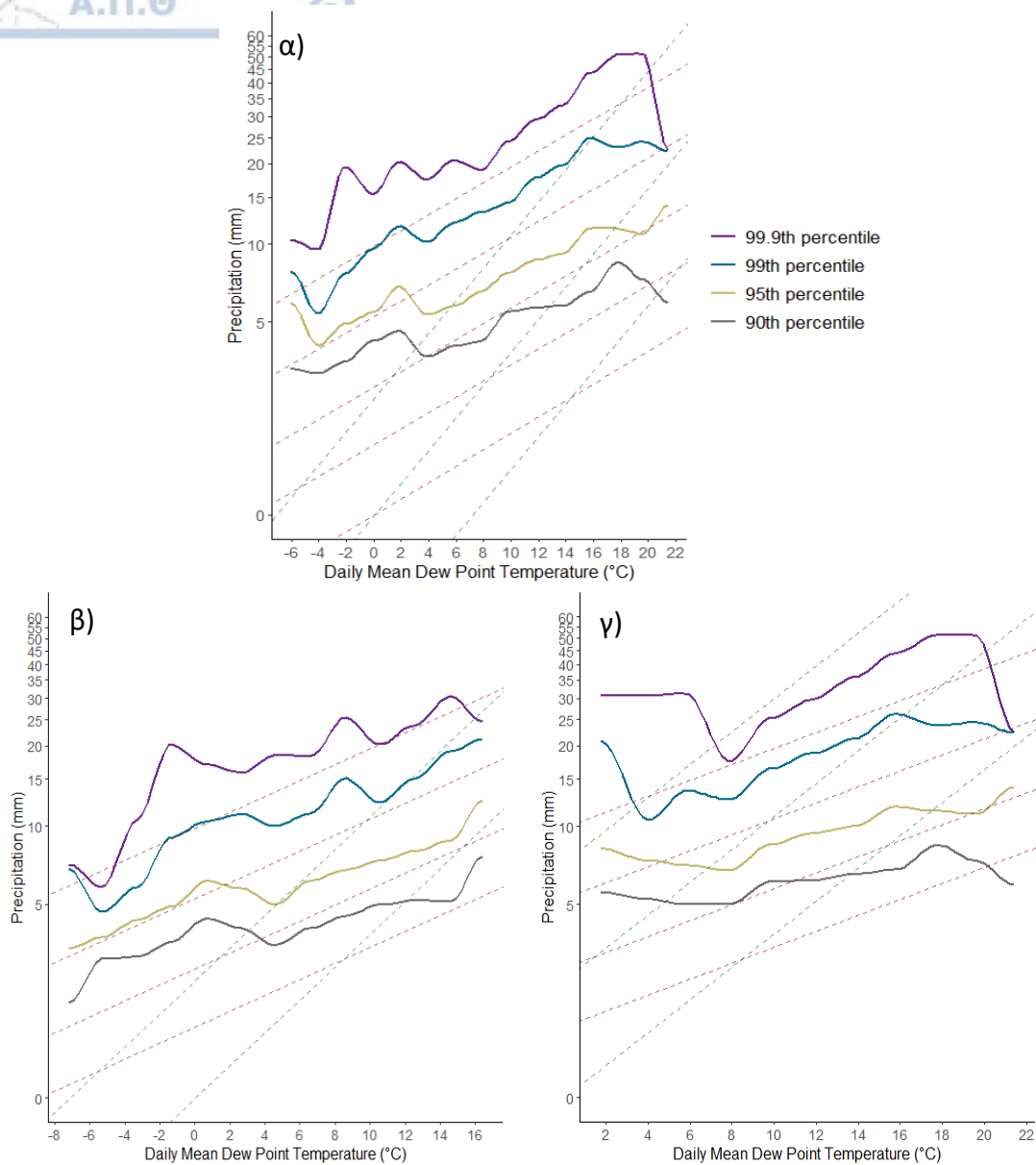
Σχήμα Π.1: Σχέση ωριαίας βροχόπτωσης με το σημείο δρόσου για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια βάσει της μεθόδου Quantile Regression. α) για το σύνολο της περιόδου 1951-2021, β) για την περίοδο Οκτωβρίου-Μαρτίου (χειμερινό εξάμηνο), γ) για την περίοδο Απριλίου-Σεπτεμβρίου (θερινό εξάμηνο). Δίνονται για σύγκριση: ο ρυθμός CC (7%/°C) (κόκκινες διακεκομμένες) και ο 2CC (14%/°C) (πράσινες διακεκομμένες).



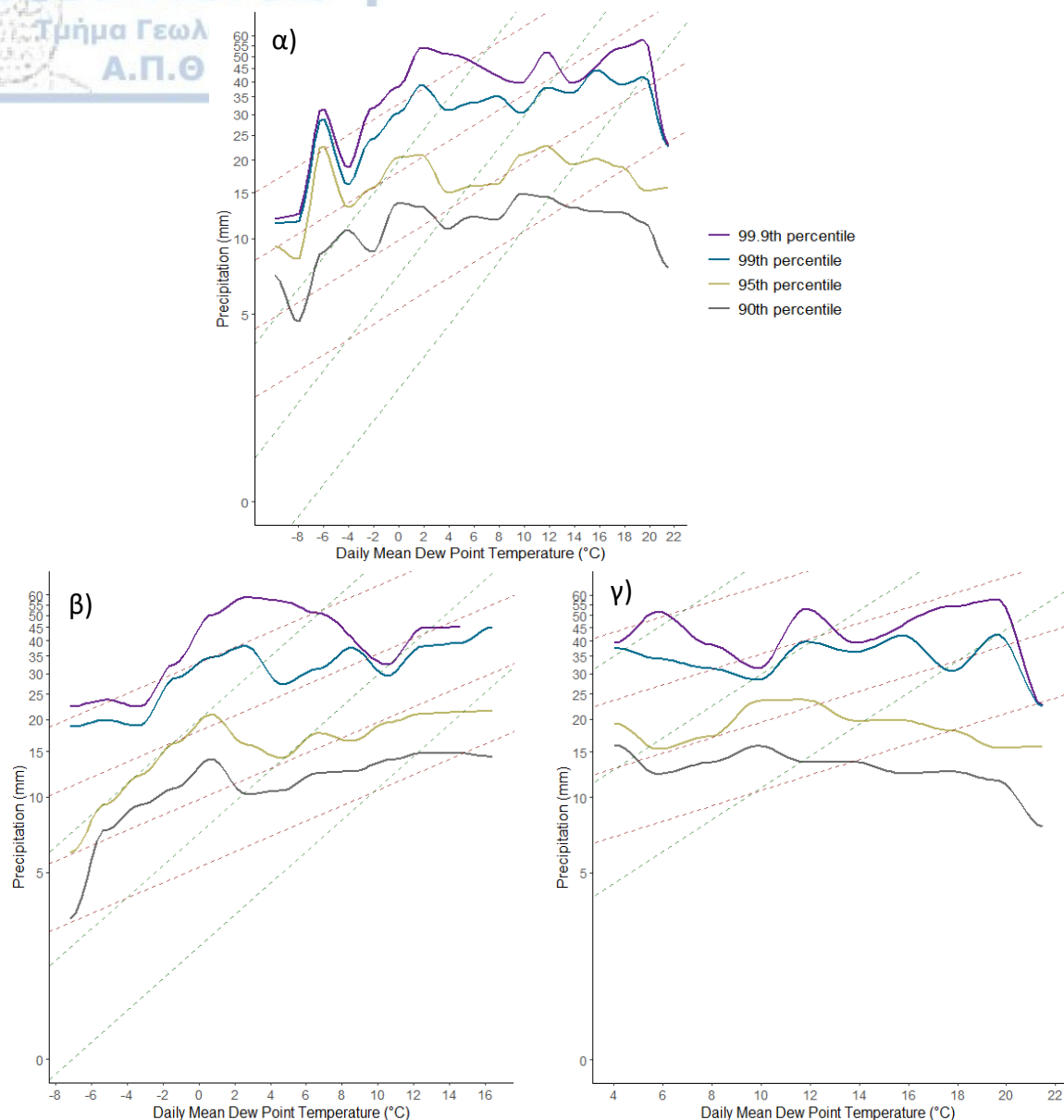
Σχήμα Π.2: Σχέση ωριαίας βροχόπτωσης με το σημείο δρόσου για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια βάση της μεθόδου Binning. α) για το σύνολο της περιόδου 1951-2021, β) για την περίοδο Οκτωβρίου-Μαρτίου (χειμερινό εξάμηνο), γ) για την περίοδο Απριλίου-Σεπτεμβρίου (θερινό εξάμηνο). Δίνονται για σύγκριση: ο ρυθμός CC (7%/°C) (κόκκινες διακεκομμένες) και ο 2CC (14%/°C) (πράσινες διακεκομμένες).



Σχήμα Π.3: Σχέση τρίωρης έντασης βροχόπτωσης με το σημείο δρόσου για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστήματα βάση της μεθόδου Quantile Regression. α) για το σύνολο της περιόδου 1951-2021, β) για την περίοδο Οκτωβρίου-Μαρτίου (χειμερινό εξάμηνο), γ) για την περίοδο Απριλίου-Σεπτεμβρίου (θερινό εξάμηνο). Δίνονται για σύγκριση: ο ρυθμός CC (7%/°C) (κόκκινες διακεκομμένες) και ο 2CC (14%/°C) (πράσινες διακεκομμένες).



Σχήμα Π.4: Σχέση τρίωρης έντασης βροχόπτωσης με το σημείο δρόσου για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια βάσει της μεθόδου Binning. α) για το σύνολο της περιόδου 1951-2021, β) για την περίοδο Οκτωβρίου-Μαρτίου (χειμερινό εξάμηνο), γ) για την περίοδο Απριλίου-Σεπτεμβρίου (θερινό εξάμηνο). Δίνονται για σύγκριση: ο ρυθμός CC ($7\%/^{\circ}\text{C}$) (κόκκινες διακεκομμένες) και ο 2CC ($14\%/^{\circ}\text{C}$) (πράσινες διακεκομμένες).



Σχήμα Π.5: Σχέση ημερήσιας βροχόπτωσης με το σημείο δρόσου για τα τέσσερα ανώτερα ποσοστημόρια βάση της μεθόδου Quantile Regression. α) για το σύνολο της περιόδου 1951-2021, β) για την περίοδο Οκτωβρίου-Μαρτίου (χειμερινό εξάμηνο), γ) για την περίοδο Απριλίου-Σεπτεμβρίου (θερινό εξάμηνο). Δίνονται για σύγκριση: ο ρυθμός CC (7%/°C) (κόκκινες διακεκομμένες) και ο 2CC (14%/°C) (πράσινες διακεκομμένες).

