

# ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΗΜΕΡΗΣΙΩΝ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΩΝ ΥΨΩΝ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ 21<sup>ΟΥ</sup> ΑΙΩΝΑ: ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΑΠΟ ΕΝΑ ΣΥΓΧΡΟΝΟ ΠΕΡΙΟΧΙΚΟ ΚΛΙΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ (RCM)

Ρούση Ευτυχία<sup>1,\*</sup>, Τολικά Κωνσταντία<sup>2</sup>, Αναγνωστοπούλου Χριστίνα<sup>2</sup>, Μαχαιρας Παναγιώτης<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Υποψήφια Διδάκτωρ, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Μετεωροσκοπείο, Πανεπιστημιούπολη Α.Π.Θ., ΤΚ 54124, τηλ. 2310998572, e-mail: erousi@geo.auth.gr

<sup>2</sup> Λέκτορας, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας Α.Π.Θ.

<sup>3</sup> Ομότιμος Καθηγητής, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας Α.Π.Θ.

## Περίληψη

Είναι γνωστό ότι ο ρόλος της βροχόπτωσης στο φυσικό και το ανθρωπογενές περιβάλλον είναι ιδιαίτερα σημαντικός και για το λόγο αυτό πολλές μελέτες σχετίζονται με την ανάλυση των χαρακτηριστικών της. Ειδικά κατά τα τελευταία χρόνια και εξαιτίας των πιθανών κλιματικών αλλαγών, το ενδιαφέρον των κλιματολόγων έχει στραφεί στη μελέτη της βροχόπτωσης και των μεταβολών της, τόσο σχετικά με τα ποσά βροχόπτωσης, όσο και με τη συχνότητα και τη χωροχρονική κατανομή της. Ειδικότερα για την περιοχή της Μεσογείου και συνεπώς και της Ελλάδας, όπου η βροχόπτωση κατά την ξηρή-θερινή περίοδο είναι περιορισμένη, το θέμα αποκτά ακόμη μεγαλύτερη σπουδαιότητα.

Στην παρούσα εργασία, η οποία αποτελεί μέρος του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος ENSEMBLES, γίνεται μία ανάλυση των μελλοντικών συχνοτήτων της ημερήσιας βροχόπτωσης και των αντίστοιχων υψών της στην Ελλάδα, όπως αυτές προκύπτουν από το Περιοχικό Κλιματικό Μοντέλο RACMO2 της Βασιλικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας της Ολλανδίας (KNMI). Το μοντέλο έχει χωρική ανάλυση 25x25km και καλύπτει τον ευρωπαϊκό χώρο με 114 σημεία πλέγματος κατά γεωγραφικό μήκος, 124 κατά γεωγραφικό πλάτος και 40 κατακόρυφα επίπεδα, ενώ για τις μελλοντικές του προβολές χρησιμοποιείται το σενάριο εκπομπών SRES A1B. Για τη συγκεκριμένη μελέτη επιλέχθηκαν τα δέκα κοντινότερα σημεία πλέγματος σε δέκα σταθμούς της Ελλάδας για τη χρονική περίοδο από το 2070 ως το 2100.

Στη συγκεκριμένη μελέτη, η ημερήσια βροχόπτωση διαχωρίζεται σε 6 κλάσεις και αναλύεται η ημερήσια έντασή της, καθώς και η συχνότητα των κλάσεων σε μηνιαία βάση. Επίσης, οι προσομοιωμένες ημερήσιες χρονοσειρές της βροχόπτωσης συγκρίνονται με τις μετρούμενες χρονοσειρές των ελληνικών σταθμών για την περίοδο ελέγχου 1960-1990.

Κύριος σκοπός της εργασίας είναι η εκτίμηση των αλλαγών που αναμένονται στη δίαυτα της βροχόπτωσης στην Ελλάδα, γεγονός που κρίνεται ιδιαίτερα χρήσιμο για το σχεδιασμό της αντιμετώπισής τους και για τη λήψη των κατάλληλων αποφάσεων.

## ANALYSIS OF THE FREQUENCY OF DAILY PRECIPITATION SERIES IN GREECE THROUGH THE 21<sup>ST</sup> CENTURY: FUTURE SCENARIOS OF A REGIONAL CLIMATE MODEL (RCM)

Rousi Eftychia<sup>1,\*</sup>, Tolika Konstantia<sup>2</sup>, Anagnostopoulou Christina<sup>2</sup>, Maheras Panagiotis<sup>3</sup>

<sup>1</sup> PhD Candidate, Aristotle University of Thessaloniki, School of Geology, Department of Meteorology and Climatology, Building of Meteoroskopeio, Aristotle University Campus, Thessaloniki 54124, tel. +30 2310998572, e-mail: erousi@geo.auth.gr

<sup>2</sup> Lecturer, Aristotle University of Thessaloniki, School of Geology, Department of Meteorology and Climatology

<sup>3</sup> Professor Emeritus, Aristotle University of Thessaloniki, School of Geology, Department of Meteorology and Climatology

## Abstract

It is widely accepted that precipitation is a very important factor both for physical and human environment. Especially during the last decades and due to the climate change that earth is facing, the interest towards the study of changes in the precipitation regime is increasing. The Mediterranean region and consequently Greece, is a very vulnerable area since especially during the hot-dry season of the year the precipitation is already very limited.

In this paper, which is part of the European Project ENSEMBLES, the future frequencies of daily precipitation are studied, using the simulated time-series of a Regional Climate Model (RCM), the RACMO2, developed by the Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI). This RCM provides a spatial analysis of 25x25km, covering Europe with 114 grid points in geographical longitude, 124 in geographical latitude and 40 vertical levels, while the scenario used for future projections is the SRES A1B. For this study 10 grid points that are the nearest to 10 Greek meteorological stations were chosen. The study period is 2070 to 2100.

Daily precipitation was divided in 6 classes so its daily intensity and the monthly frequency of the classes could be studied. In addition, since evaluation is of great importance, the simulated precipitation series are compared to station values for the period 1960-1990, the so-called control-run period.

Main scope of this paper is to estimate the possible changes in the precipitation regime of Greece through the end of the 21<sup>st</sup> century so that the appropriate planning and decisions can be made.

**Λέξεις Κλειδιά:** ανάλυση συχνοτήτων ημερήσιας βροχόπτωσης, Περιοχικό Κλιματικό Μοντέλο, μελλοντικά κλιματικά σενάρια, ημερήσια ύψη βροχόπτωσης

**Key Words:** frequency analysis of daily precipitation, Regional Climate Model, future climate scenarios, daily amount of precipitation

## 1. Εισαγωγή

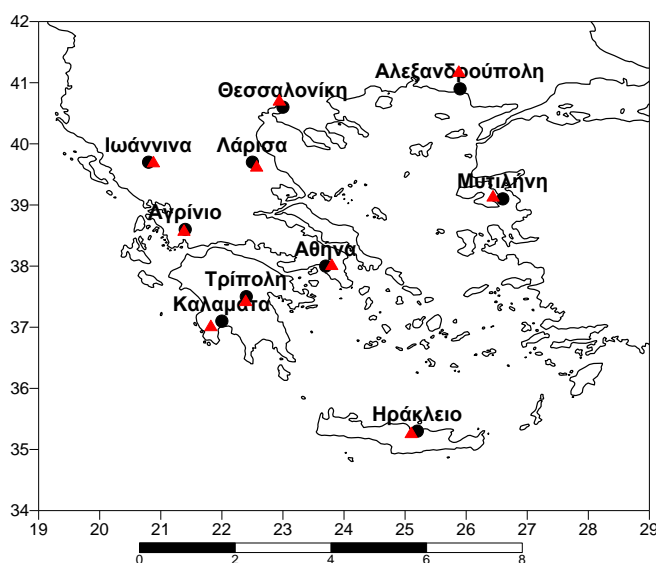
Κατά τις τελευταίες δεκαετίες το ενδεχόμενο των πιθανών κλιματικών αλλαγών έχει απασχολήσει ιδιαίτερα την επιστημονική κοινότητα, καθώς θα είχε ποικίλες επιδράσεις σε πολλούς τομείς όπως το περιβάλλον, η οικονομία, οι κοινωνικές δομές και γενικότερα η ανθρώπινη δραστηριότητα (γεωργία, διαχείριση υδάτινων αποθεμάτων, κ.τ.λ.). Σύμφωνα με την τελευταία έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για το Κλίμα (Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC) που δημοσιεύθηκε το 2007, η θέρμανση του πλανήτη αποτελεί πλέον αδιαμφισβήτητο γεγονός, το οποίο επιβεβαιώνεται από παρατηρήσεις αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του αέρα του πλανήτη και της θερμοκρασίας των ωκεανών, του εκτεταμένου λιωσίματος χιονιού και πάγου, και της ανόδου της μέσης στάθμης της θάλασσας. Όσον αφορά στη βροχόπτωση, το IPCC εκτιμά πως αυτή θα αυξηθεί στις περιοχές με μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, ενώ θα μειωθεί στα μέσα γεωγραφικά πλάτη, σε περιοχές όπως είναι η Μεσόγειος και η Ελλάδα. Πρέπει βέβαια να αναφερθεί ότι, ειδικά για την περιοχή της Μεσογείου και λόγω της πολύπλοκης τοπογραφίας της και του τοπικού χαρακτήρα της βροχόπτωσης, τα κλιματικά μοντέλα δεν έχουν ακόμη καταφέρει να προσομοιώσουν αρκετά ικανοποιητικά τα χαρακτηριστικά της. Προς αυτή την κατεύθυνση στρέφεται και η παρούσα μελέτη, επιχειρώντας να αξιολογήσει τη λειτουργία ενός μοντέλου και να ερευνήσει τις μεταβολές στην ένταση και το ύψος της βροχόπτωσης κατά τα επόμενα χρόνια.

Τα Περιοχικά Κλιματικά Μοντέλα (Regional Climate Models-RCMs) αποτελούν το πιο χρήσιμο και ελπιδοφόρο εργαλείο στην εκτίμηση των κλιματικών αλλαγών σε τοπική/περιφερειακή κλίμακα. Προέρχονται με υποβιβασμό κλίμακας από τα Γενικά Μοντέλα Κυκλοφορίας (General Circulation Models-GCMs), τα οποία παράγουν τρισδιάστατες αριθμητικές προσομοιώσεις της ατμόσφαιρας, των ωκεανών και των ηπείρων, βασιζόμενες σε αναπαραστάσεις των σχετικών δυναμικών και φυσικών διαδικασιών (Noguer et al., 1998). Τα RCMs παρέχουν πληροφορία σε κλίμακα της τάξεως των 25km και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση του κλίματος σε συγκεκριμένες περιοχές του πλανήτη. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιείται το RCM RACMO2, που έχει χωρική ανάλυση 25x25km και καλύπτει τον ευρωπαϊκό χώρο με 114 σημεία πλέγματος κατά γεωγραφικό μήκος, 124 κατά γεωγραφικό πλάτος και 40 κατακόρυφα επίπεδα (White, ed,

2002, Lenderink et al., 2003), ενώ για τις μελλοντικές του προβολές χρησιμοποιείται το σενάριο εκπομπών SRES A1B (Special Report on Emission Scenarios of IPCC, 2007).

## 2. Δεδομένα – Μεθοδολογία

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη χωρίζονται σε δύο ομάδες. Η πρώτη περιλαμβάνει τα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης από 10 ελληνικούς σταθμούς, και συγκεκριμένα την Αλεξανδρούπολη, τη Θεσσαλονίκη (σταθμός Αριστοτελείου Πανεπιστημίου), τη Μυτιλήνη, τη Λάρισα, τα Ιωάννινα, το Αγρίνιο, την Αθήνα (σταθμός Αστεροσκοπείου), την Τρίπολη, την Καλαμάτα και το Ηράκλειο (Σχήμα 1), για την τριαντακονταετία 1960-1990 που καλείται και περίοδος ελέγχου. Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει ημερήσια προσομοιωμένα δεδομένα βροχόπτωσης, όπως αυτά προέκυψαν από το μοντέλο RACMO2 στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Ερευνητικού Προγράμματος ENSEMBLES (<http://ensembles-eu.metoffice.com>), τόσο για την περίοδο ελέγχου 1960-1990, όσο και για την περίοδο 2070-2100, για 10 σημεία πλέγματος που είναι τα κοντινότερα στους σταθμούς που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ο χάρτης του Σχήματος 1 παρουσιάζει τους 10 σταθμούς και τα σημεία πλέγματος που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 1. Χάρτης των σταθμών μελέτης (κύκλος μαύρου χρώματος) και των κοντινότερων τους σημείων πλέγματος (τρίγωνο κόκκινου χρώματος).

Το ημερήσιο ύψος βροχής είναι μια χρήσιμη μετεωρολογική παράμετρος, που καταγράφει μη συνεχή φαινόμενα, μπορεί δηλαδή να είναι το άθροισμα δύο ή περισσότερων ξεχωριστών επεισοδίων βροχόπτωσης της ίδιας ημέρας. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία, πραγματοποιείται κατανομή της βροχόπτωσης ανά μήνα σε κλάσεις, βάσει της ημερήσιας έντασης βροχής. Έτσι μπορεί να διαπιστωθεί τι είδους βροχές (ασθενείς, ισχυρές κτλ) επικρατούν στον κάθε σταθμό και κατά πόσο συμβάλουν στο μηνιαίο και ετήσιο ύψος βροχής. Ο διαχωρισμός των κλάσεων που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στον Πίνακα 1 και είναι βασισμένος στον Reguy (1970) και τροποποιημένος από το Μαχαίρα (1983) για την ελληνική περιοχή.

Πίνακας 1. Κλάσεις και χαρακτηρισμός βροχόπτωσης.

Κλάση	Όρια (mm βροχής/επεισόδιο)	Χαρακτηρισμός
1	0,1-2,5	ασθενής βροχόπτωση
2	2,6-5	μέτρια βροχόπτωση
3	5,1-10	ισχυρή βροχόπτωση
4	10,1-20	πολύ ισχυρή βροχόπτωση
5	20,1-30	ισχυρή καταιγίδα
6	>30,1	πολύ ισχυρή καταιγίδα / πλημμυρογενής βροχή

Για την αξιολόγηση της απόδοσης του RCM στην προσομοίωση της έντασης και των συχνοτήτων της βροχόπτωσης στην Ελλάδα, υπολογίστηκαν οι διαφορές μεταξύ των προσομοιωμένων χρονοσειρών των σημείων πλέγματος και των παρατηρούμενων χρονοσειρών των αντίστοιχων σταθμών. Στη συνέχεια ελέγχθηκε η στατιστική σημαντικότητα των διαφορών με χρήση των ελέγχων  $\chi^2$  και Student's t για τις συχνότητες των κλάσεων και τα ύψη βροχής τους αντίστοιχα. Με τον έλεγχο  $\chi^2$  εξετάζεται το αν οι παρατηρούμενες, ή εμπειρικές, συχνότητες, είναι ίσες με τις θεωρητικές, ή αναμενόμενες, που προκύπτουν από το μοντέλο. Όταν, λοιπόν, οι αποκλίσεις μεταξύ παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων είναι μεγάλες, οι διαφορές θεωρούνται στατιστικά σημαντικές και συνεπώς η προσομοίωση από το μοντέλο κρίνεται μη ικανοποιητική στο επίπεδο σημαντικότητας που έχει καθοριστεί και που στην παρούσα εργασία είναι το 95%. Αντίστοιχα, ο έλεγχος Student's t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών είναι ένα εργαλείο που εκτελεί έλεγχο δύο δειγμάτων ανά ζεύγη για να καθορίσει κατά πόσο οι μέσες τιμές ενός δείγματος είναι διακριτές, ενώ δεν υποθέτει ότι οι διακυμάνσεις των δύο πληθυσμών είναι ίσες. Έτσι για κάθε επίπεδο σημαντικότητας υπάρχει μια κρίσιμη τιμή του t, η οποία καθορίζει το ποιες διαφορές είναι στατιστικά σημαντικές (Storch and Zwiers, 1999).

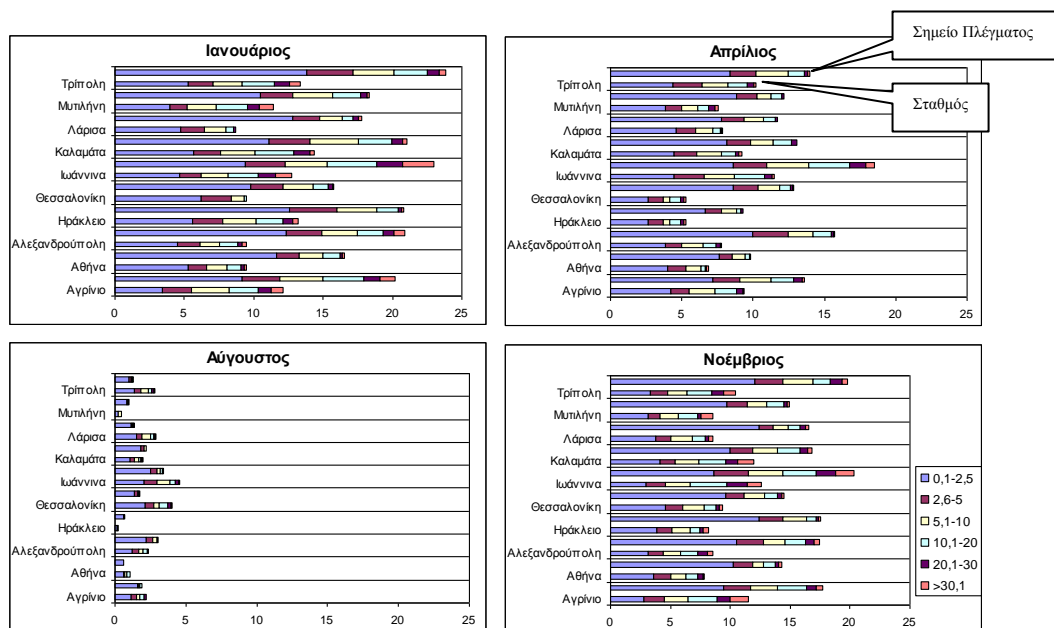
### 3. Αποτελέσματα

#### 3.1. Αξιολόγηση μοντέλου στην περίοδο ελέγχου

Αρχικά υπολογίστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης για τους δέκα σταθμούς μελέτης και τα αντίστοιχα σημεία πλέγματος και συγκεκριμένα το μέσο ετήσιο ύψος και ο μέσος αριθμός ημερών βροχής για την περίοδο ελέγχου 1960-1990.

Η αξιολόγηση των προσομοιωμένων χρονοσειρών έγινε μέσω του υπολογισμού των διαφορών τους από τις παρατηρούμενες χρονοσειρές των σταθμών, τόσο για τα ύψη και τις ημέρες βροχόπτωσης, όσο και για τις συχνότητες των κλάσεων. Ο μέσος ετήσιος αριθμός ημερών βροχής υπερεκτιμάται σημαντικά από το μοντέλο, ενώ το μέσο ετήσιο ύψος βροχής υποεκτιμάται σε όλους τους σταθμούς εκτός των Ιωαννίνων και της Αλεξανδρούπολης. Από τις τελευταίες αυτές διαφορές, η μόνη περίπτωση που η προσομοίωση είναι ικανοποιητική και η διαφορά μη στατιστικά σημαντική είναι ο σταθμός της Λάρισας. Όσον αφορά στην προσομοίωση από το μοντέλο των υψών βροχής ανά μήνα, τόσο σε κλάσεις, όσο και στο σύνολο της βροχόπτωσης, αυτή αποδείχτηκε μετρίως ικανοποιητική, καθώς οι διαφορές που προέκυψαν στις μισές περίπου περιπτώσεις είναι στατιστικά σημαντικές. Σε γενικές γραμμές διαπιστώθηκε υποεκτίμηση των υψών κατά τη θερμή περίοδο και συγκεκριμένα από το Μάιο έως το Σεπτέμβριο, ενώ κατά τους υπόλοιπους μήνες υπερεκτίμηση. Υπάρχουν μικρές εξαιρέσεις και διακυμάνσεις στις διάφορες πόλεις. Σε κάποιους σταθμούς η προσομοίωση είναι πολύ πιο ικανοποιητική απ' ό,τι σε άλλους. Ανάμεσα σε αυτούς είναι το Ηράκλειο, για το οποίο οι διαφορές που προέκυψαν είναι αμελητέες στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, και στη συνέχεια αυτοί της Αθήνας και της Καλαμάτας. Αντίθετα, σταθμοί όπου η πλειοψηφία των διαφορών είναι στατιστικά σημαντική, είναι το Αγρίνιο και τα Ιωάννινα. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι δύο αυτές περιπτώσεις έχουν τη μεγαλύτερη βροχόπτωση ανάμεσα στους σταθμούς μελέτης, ενώ το Ηράκλειο και η Αθήνα ανήκουν στους σταθμούς με τα χαμηλότερα ύψη βροχής.

Σε αντίθεση με τα ύψη της βροχόπτωσης, όπου κατά περιπτώσεις το μοντέλο λειτουργεί ικανοποιητικά, τόσο οι ημέρες βροχής όσο και οι συχνότητες των κλάσεων φαίνεται πως δεν προσομοιώνονται ικανοποιητικά από αυτό. Οι ημέρες βροχής και ειδικά οι συχνότητες των μικρών κλάσεων υπερεκτιμούνται σημαντικά όπως φαίνεται και στο σχήμα 2, όπου παρουσιάζονται οι συχνότητες των κλάσεων για τα πραγματικά δεδομένα των υπό μελέτη σταθμών αλλά και τα δεδομένα που προέκυψαν από το μοντέλο για την ίδια περίοδο (1960-1990) για τέσσερις χαρακτηριστικούς μήνες. Σε όλες τις περιπτώσεις η μεγαλύτερη υπερεκτίμηση σημειώνεται στην πρώτη κλάση, δηλαδή στις ασθενείς βροχοπτώσεις. Οι διαφορές φαίνεται να είναι μεγαλύτερες κατά το χειμώνα, αλλά θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι κατά την εποχή αυτή σημειώνονται και οι μεγαλύτερες συχνότητες. Όπως έδειξε ο έλεγχος  $\chi^2$ , η συντριπτική πλειοψηφία των διαφορών που προέκυψαν είναι στατιστικά σημαντική. Επομένως, η χρήση των μελλοντικών προσομοιώσεων θα πρέπει να γίνεται με πολύ μεγάλη προσοχή και επιφύλαξη.

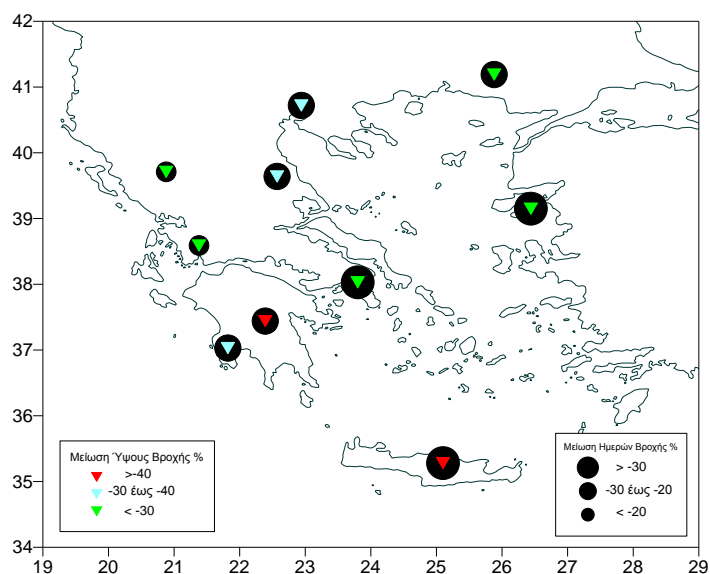


Σχήμα 2. Περιπτώσεις της κάθε κλάσης βροχόπτωσης για τους σταθμούς μελέτης (κάτω ράβδος) και τα σημεία πλέγματος (επάνω ράβδος) για την περίοδο ελέγχου 1960-1990 για τέσσερις μήνες.

### 3.2. Μελλοντικές εκτιμήσεις

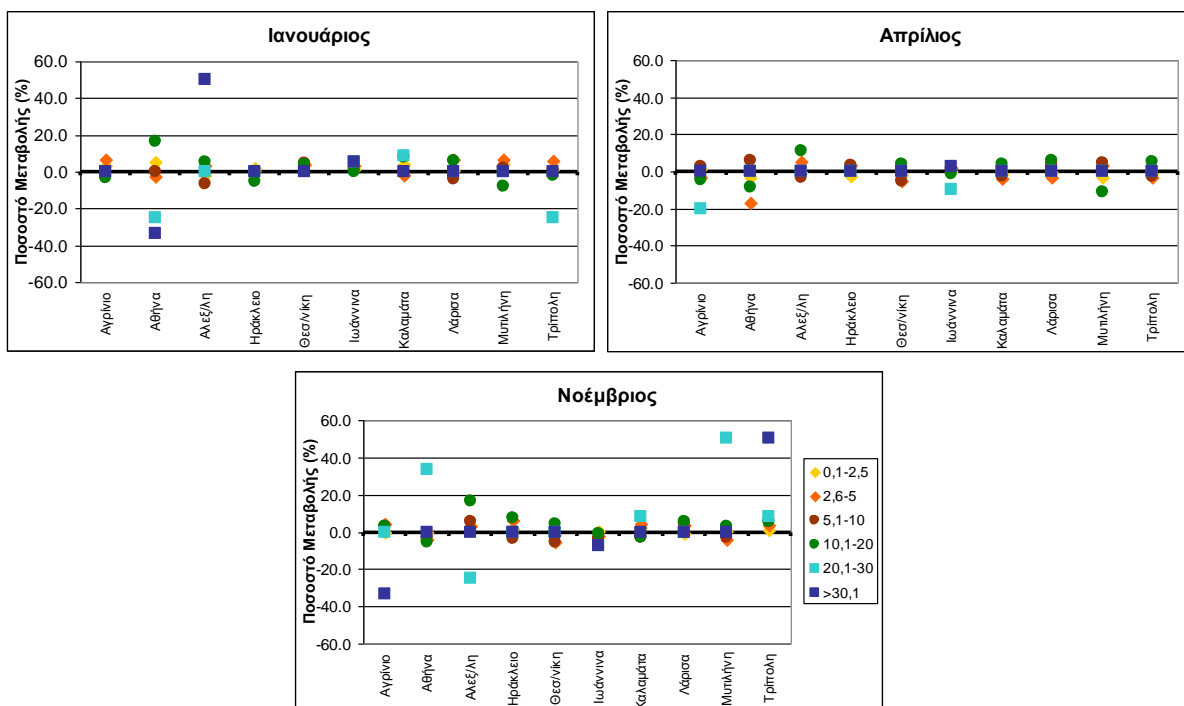
Όσον αφορά στις μελλοντικές εκτιμήσεις, υπολογίστηκαν οι διαφορές μεταξύ των προσομοιωμένων χρονοσειρών για την περίοδο ελέγχου 1960-1990 από τη μελλοντική περίοδο 2070-2100. Οι διαφορές που προέκυψαν από τους μέσους όρους των δύο περιόδων για το ύψος και τις ημέρες βροχόπτωσης δείχνουν μια σημαντική μείωση και των δύο παραμέτρων σε όλα τα σημεία πλέγματος. Η μείωση του ύψους βροχής κυμαίνεται από τα 67mm για το σημείο πλέγματος της Μυτιλήνης έως τα 248mm για αυτό των Ιωαννίνων, ενώ οι ημέρες βροχής αναμένεται να μειωθούν μέχρι και 32 ανά έτος. Στο χάρτη του Σχήματος 3 παρουσιάζεται η ποσοστιαία για κάθε σημεία πλέγματος μείωση των δύο παραμέτρων. Παρατηρείται λοιπόν ότι το ύψος βροχής παρουσιάζει πιο σημαντική μείωση από τις ημέρες βροχής, με ποσοστά που φτάνουν έως και 52% στο Ηράκλειο και 46% στην Τρίπολη, ενώ η μικρότερη μείωση είναι 19% και σημειώνεται στη Μυτιλήνη. Για τις ημέρες βροχής προέκυψε ελάττωση από 18% για τα Ιωάννινα έως 39% για την Αθήνα. Στο χάρτη του Σχήματος 3 μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι ταυτόχρονη μεγάλη μείωση και των δύο παραμέτρων σημειώνεται μόνο στο Ηράκλειο, ενώ μικρότερη μείωση ύψους και ημερών βροχής παρατηρείται στα Ιωάννινα και το Αγρίνιο.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εκτίμηση των μελλοντικών αλλαγών των μηνιαίων συχνοτήτων και υψών βροχής των προκαθορισμένων κλάσεων. Το Σχήμα 4 παρουσιάζει τις μεταβολές που προέκυψαν στις συμβολές των κλάσεων στο σύνολο της βροχόπτωσης για κάθε



Σχήμα 3. Χάρτης της ποσοστιαίας μείωσης των ημερών βροχής (μαύρη στίξη) και του ύψους βροχής (έγχρωμη στίξη) σύμφωνα με το RCM για την περίοδο 2070-2100 σε σχέση με την περίοδο ελέγχου 1960-1990.

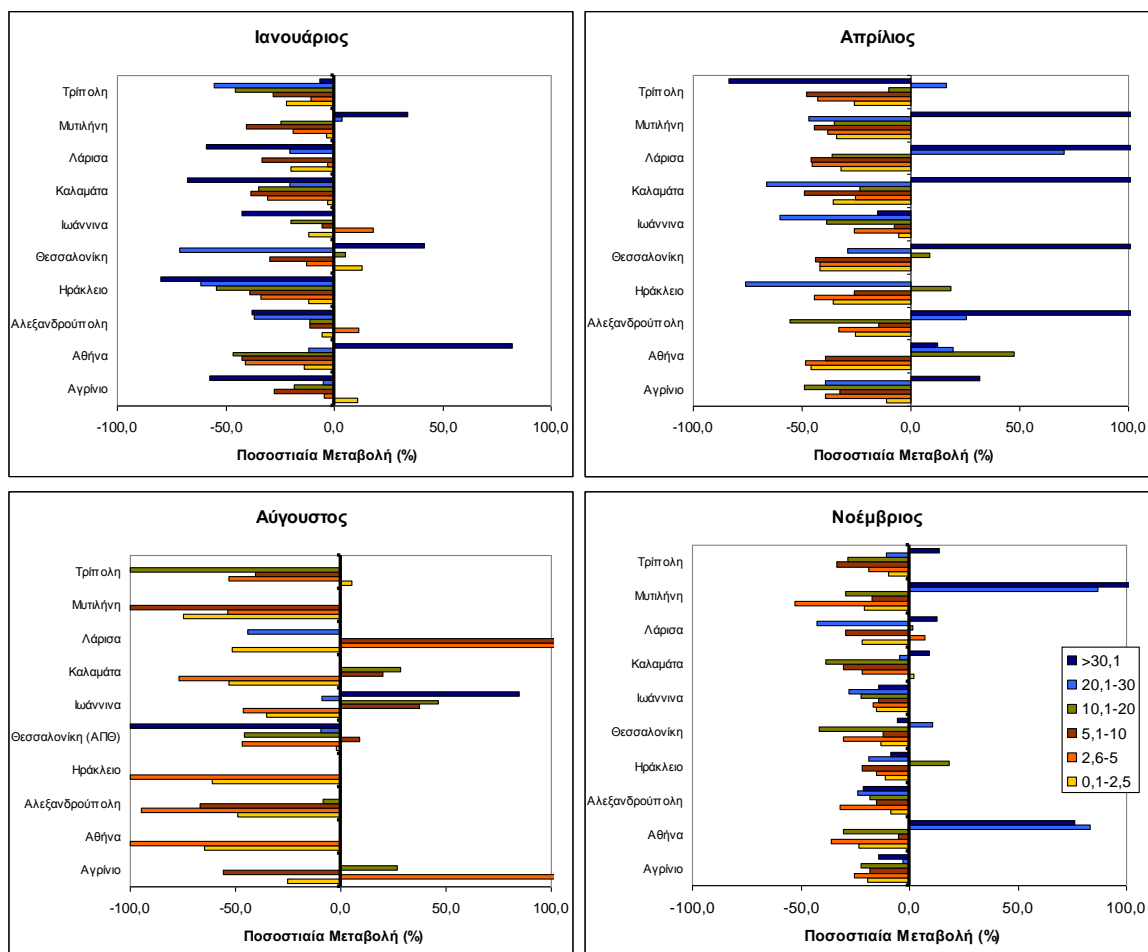
σημείο πλέγματος για τρεις μήνες. Κατά τον Ιανουάριο σημειώνονται στην πλειοψηφία των σημείων πλέγματος αυξομειώσεις της τάξης του 5% στη συμβολή των διαφόρων κλάσεων. Εξαιρέση αποτελούν το σημείο πλέγματος της Αλεξανδρούπολης, όπου η συμβολή της μεγαλύτερης κλάσης αυξάνεται κατά 50%, και τα σημεία πλέγματος της Αθήνας και της Τρίπολης, όπου η συμβολή των δύο μεγαλύτερων κλάσεων μειώνεται κατά 50 και 25% αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στο σχήμα, κατά τον Απρίλιο οι μεταβολές είναι μικρές, ενώ ο Αύγουστος δεν παρουσιάζεται επειδή οι διαφορές είναι μηδενικές. Κατά το Νοέμβριο οι διαφορές είναι ασήμαντες στις μικρές κλάσεις αλλά αρκετά σημαντικές στις μεγάλες και στα ίδια σημεία πλέγματος που αναφέρθηκαν προηγουμένα συν το κοντινό σημείο πλέγματος της Μυτιλήνης.



Σχήμα 4. Ενδεικτικά γραφήματα για τους μήνες Ιανουάριο, Απρίλιο και Νοέμβριο (ο Αύγουστος δεν παρατίθεται επειδή η πλειοψηφία των περιπτώσεων είναι μηδέν) του ποσοστού μεταβολής της συνεισφοράς των κλάσεων στη συνολική βροχόπτωση της περιόδου 2070-2100 σε σχέση με την 1960-1990.

Στις μελλοντικές εκτιμήσεις για το ύψος βροχής ανά κλάση (στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τέσσερις χαρακτηριστικούς μήνες), όπως είναι αναμενόμενο επικρατεί η ελάττωσή του. Πιο αναλυτικά, και σε μηνιαία βάση, κατά τον Ιανουάριο η πλειοψηφία των περιπτώσεων παρουσιάζει μείωση του ύψους βροχής κατά την περίοδο 2070-2100. Στις εξαιρέσεις ανήκουν τα σημεία πλέγματος που αντιστοιχούν στην Αθήνα, τη Θεσσαλονίκη και τη Μυτιλήνη, όπου ορισμένες κλάσεις και ειδικά οι μεγάλες, σημειώνουν αύξηση, που στην περίπτωση της Αθήνας φτάνει το 80%. Παρόμοια είναι η κατάσταση και το Φεβρουάριο με τη διαφορά ότι σε περισσότερα σημεία πλέγματος παρατηρείται αύξηση του ύψους βροχής που οφείλεται σε ισχυρές και πολύ ισχυρές καταιγίδες (δύο μεγαλύτερες κλάσεις), αλλά σε μικρότερα ποσοστά. Κατά το Μάρτιο, το ύψος βροχόπτωσης μειώνεται σε όλα τα σημεία πλέγματος και τις κλάσεις. Ο Απρίλιος αποτελεί μια ιδιαίτερη περίπτωση καθότι υπάρχουν σημαντικές αυξήσεις, κυρίως των δύο μεγάλων κλάσεων, σε επτά από τα δέκα σημεία πλέγματος. Ιδιαίτερα, στα σημεία πλέγματος της Αλεξανδρούπολης, της Θεσσαλονίκης, της Καλαμάτας, της Λάρισας και της Μυτιλήνης, το ύψος βροχής που προέρχεται από πολύ ισχυρές καταιγίδες αναμένεται να αυξηθεί κατά 100% και πλέον. Το μόνο σημείο πλέγματος όπου η μεγάλη κλάση βροχόπτωσης μειώνεται σημαντικά είναι αυτό της Τρίπολης με ποσοστό μείωσης 80%. Πρέπει όμως να τονιστεί ότι η ποσοστιαία ή σχετική μεταβολή, παρόλο που είναι πιο χρήσιμη από την απόλυτη, μερικές φορές μπορεί να είναι παραπλανητική, καθώς για παράδειγμα η 100% αύξηση της βροχόπτωσης του Απριλίου στη Θεσσαλονίκη αντιστοιχεί μόλις σε 2,4mm βροχής επιπλέον σε σύγκριση με την περίοδο ελέγχου. Κατά τους μήνες Μάιο με Ιούλιο στη μεγάλη πλειοψηφία των περιπτώσεων σημειώνεται ελάττωση του ύψους βροχής, ενώ κατά τον Αύγουστο υπάρχουν και περιπτώσεις

αύξησης, αυτή τη φορά των μεσαίων κλάσεων βροχής. Το Σεπτέμβριο η ελάττωση είναι αρκετά σημαντική και ειδικά στις μεγάλες κλάσεις, με μοναδική εξαίρεση το σημείο πλέγματος του Αγρινίου. Ο Οκτώβρης παρουσιάζει εικόνα παρόμοια με του Απρίλη, πολλές δηλαδή περιπτώσεις αύξησης των μεγάλων κλάσεων βροχόπτωσης και μείωσης των υπόλοιπων κλάσεων. Κατά το Νοέμβριο και Δεκέμβριο παρατηρούνται οι μικρότερες σχετικά με τους υπόλοιπους μήνες μειώσεις και δεν ξεπερνούν στις περισσότερες περιπτώσεις το 50%.



Σχήμα 5. Ενδεικτικά γραφήματα για τους μήνες Ιανουάριο, Απρίλιο, Αύγουστο και Νοέμβριο των διαφορών του ύψους βροχόπτωσης ανά κλάση της περιόδου 2070-2100 σε σχέση με την 1960-1990.

#### 4. Συμπεράσματα

Στην παρούσα μελέτη έγινε αρχικά αξιολόγηση της λειτουργίας του μοντέλου RACMO2 στην προσομοίωση των χαρακτηριστικών της βροχόπτωσης στην ελλαδική περιοχή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα ύψη βροχόπτωσης που προέκυψαν από το μοντέλο διαφέρουν σημαντικά από τα πραγματικά ύψη. Συγκεκριμένα, το ύψος βροχόπτωσης υπερεκτιμάται κατά την ψυχρή και υποεκτιμάται κατά τη θερμή περίοδο, ενώ οι ημέρες βροχής υπερεκτιμούνται, όπως και η συχνότητα των επεισοδίων ασθενούς βροχόπτωσης. Σε ανάλογα συμπεράσματα και ειδικά για περιοχές της Ελλάδας και της Μεσογείου έχουν καταλήξει επίσης οι Bergant et al. (2007), Gallardo et al. (2001) και άλλοι.

Σχετικά με τις μελλοντικές εκτιμήσεις της βροχόπτωσης στην Ελλάδα, το μοντέλο δείχνει μια σημαντική μείωση τόσο του ύψους όσο και των ημερών βροχόπτωσης για την περίοδο μελέτης 2070-2100. Όσον αφορά στην ένταση της βροχής που μελετήθηκε μέσα από τη συχνότητα ορισμένων κλάσεων, σε γενικές γραμμές δεν αναμένονται σημαντικές μεταβολές στην κατανομή της βροχόπτωσης. Σε κάποια σημεία πλέγματος όμως, παρατηρήθηκε μία επαναλαμβανόμενη για αρκετούς μήνες αύξηση ή μείωση της συμβολής των μεγάλων κλάσεων στη συνολική βροχόπτωση. Όπως ήταν αναμενόμενο, για το ύψος βροχής, ανά κλάση, διαπιστώθηκε μείωση. Η μείωση αυτή οφείλεται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων στη μείωση του ύψους βροχής που

προέρχεται από επεισόδια που ανήκουν στις μικρές κλάσεις, δηλαδή από ασθενείς και μέτριες βροχές. Οι μεγάλες κλάσεις-ισχυρές και πολύ ισχυρές καταιγίδες-σημειώνουν κατά τη διάρκεια πολλών μηνών και σε πολλά σημεία πλέγματος, αύξηση. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με τις εκτιμήσεις της πιο πρόσφατης έκθεσης του IPCC, όπου σημειώνεται πως η τάση προς επικράτηση μεγάλων περιόδων ξηρασίας σε συνδυασμό με το ότι η βροχόπτωση αναμένεται να συγκεντρώνεται σε λιγότερα, αλλά πιο ραγδαία επεισόδια τα οποία θα εκδηλώνονται σε ερημοποιημένες περιοχές και θα προκαλούν πλημμύρες, αποτελεί μεγάλη απειλή για τα μεσογειακά οικοσυστήματα, καθώς και για την οικονομία αλλά και την ανθρώπινη ζωή (IPCC, 2007).

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι παρά το γεγονός ότι έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες σχετικά με την αξιολόγηση των RCMs, αυτά εξακολουθούν να παρουσιάζουν συστηματικά σφάλματα στην προσομοίωση σημαντικών κλιματικών παραμέτρων και ιδιαίτερα της βροχόπτωσης (Moberg and Jones, 2004), συμπέρασμα που προέκυψε και από την παρούσα εργασία. Για το λόγο αυτό πρέπει τα αποτελέσματά τους να αντιμετωπίζονται με προσοχή και επιφύλαξη, όπως τονίζεται σε πολλές μελέτες (Giorgi and Lionello, 2008, Beniston et al., 2007 κ.α.). Παρά το γεγονός αυτό όμως, η αναμενόμενη τάση μείωσης των ημερών και του ύψους βροχόπτωσης κατά τις ερχόμενες δεκαετίες θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον σχεδιασμό και τη λήψη αποφάσεων από τους ειδικούς.

**Ευχαριστίες:** Η παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ENSEMBLES που χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (contract number GOCE-CT-2003-505539).

## Βιβλιογραφία

- Beniston M., D.B. Stephenson, O.B. Christensen, C. Ferro, C. Frei, S. Goyette, K. Halsnaes, T. Holt, K. Jylhä, B. Koffi, J. Palutikof, R. Schöll, T. Semmler and K. Woth (2007): Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*. **81**, 71-95
- Bergant Kl., M. Belda T. and Halenka (2007): Systematic errors in the simulation of European climate (1961-2000) with RegCM3 driven by NCEP/NCAR reanalysis. *International Journal of Climatology*. **27**, 455-472
- Gallardo Cl., A. Arribas, J.E. Prego, M.A. Gaertner and M. De Castro (2001): Multi-year simulations using a regional-climate model over the Iberian Peninsula: Current climate and doubled CO<sub>2</sub> scenario. *Quarterly Journal of Royal Meteorology Society*. **127**, 1659-1681
- Giorgi F. And P. Lionello (2008): Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*. **63**, 90-104
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007): *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Lenderink B., E. van den Hurk, A. van Meijgaard, van Ulden and J. Cuijpers (2003): *Simulation of present-day climate in RACMO2: first results and model developments*. KNMI Technical Report 252, 24 pp.
- Maheras, P. 1983: *Climatologie de la Mer Egee et des marges continentales*. These d'Etat, Atelier de Reproduction des Theses de Lille III.
- Moberg A. and P.D. Jones (2004): Regional climate model simulations of daily maximum and minimum near-surface temperatures across Europe compared with observed station data 1961-1990. *Climate Dynamics*. **23**, 695-715
- Noguer M., R. Jones and J. Murphy (1998): Sources of systematic errors in the climatology of a regional climate model over Europe. *Climate Dynamics*. **14**, 691-712.
- Peguy, Ch. 1970: *Precis de climatologie*. Masson.
- Storch, H. V., F. W. Zwiers, 1999: *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press, London, pp.112.
- White P.W. (ed.) (2002): Physical processes (CY23R4). *IFS documentation*, available on-line: <http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs>