

ΜΕΛΕΤΗ ΑΚΡΑΙΩΝ ΥΔΡΟ-ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ

ΙΟΡΔΑΝΙΔΟΥ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Επιβλέπων καθηγητής: Ιωάννης Τσάνης

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

2016





Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Υγειονομική και Περιβαλλοντική Μηχανική»

Διδακτορική Διατριβή

«Μελέτη ακραίων υδρο-μετεωρολογικών φαινομένων στην ανατολική Μεσόγειο»

Βασιλική Ιορδανίδου

Διπλωματούχος Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πολυτεχνείου Κρήτης

MSc Σχολή Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Πολυτεχνείου Κρήτης



Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Υγειονομική και Περιβαλλοντική Μηχανική»

Η παρούσα διδακτορική διατριβή υποβλήθηκε στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος – Πολυτεχνείο Κρήτης.

Εκπονήθηκε στη Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος-Πολυτεχνείο Κρήτης,

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 20 Οκτωβρίου 2016

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

Ι. Κ. Τσάνης, Καθηγητής Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης, Επιβλέπων

Γ. Καρατζάς, Καθηγητής και Κοσμήτορας της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης, Εξεταστής

Δ. Χριστόπουλος, Καθηγητής Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Μ. Λαζαρίδης, Καθηγητής Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης, Εξεταστής

Δ. Κολοκοτσά, Επίκουρος Καθηγήτρια Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης, Εξεταστής

Α. Κουτρούλης, μέλος ΕΔΙΠ Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Ε. Φλόκα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Τομέας Φυσικής Περιβάλλοντος-Μετεωρολογίας Πανεπιστημίου Αθηνών, Εξωτερική Εξεταστής

Τίτλος Διδακτορικής Διατριβής:

Μελέτη ακραίων υδρο-μετεωρολογικών φαινομένων στην ανατολική Μεσόγειο

«Η έγκριση της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής από τη Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων της συγγραφέως» (Ν. 5343/1932, άρθρο 202, παρ. 2)

Περίληψη

Οι ακραίες βροχοπτώσεις αποτελούν σοβαρή κοινωνικό-οικονομική απειλή στις σύγχρονες κοινωνίες. Η δραστηριότητα τόσο των υφέσεων όσο και των κεραυνών συνδέεται με την εκδήλωση ακραίων βροχοπτώσεων. Ισχυρές βροχοπτώσεις και πλημμύρες πολύ συχνά συνδέονται με το πέρας υφέσεων, ιδιαίτερα στην περιοχή της Μεσογείου. Επιπλέον, φαινόμενα καταιγίδας, στα οποία οι κεραυνοί αποτελούν χαρακτηριστικό γνώρισμα, σε πολλές περιπτώσεις καταλήγουν σε ακραία φαινόμενα βροχής.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή μελετώνται ακραία υδρο-μετεωρολογικά φαινόμενα στην ανατολική Μεσόγειο. Πιο συγκεκριμένα διερευνάται η πιθανή συσχέτιση που έχει η εκδήλωση έντονων βροχοπτώσεων με χαρακτηριστικά των υφέσεων για την περίοδο 1979-2011 και με τους κεραυνούς για την περίοδο 2012-2014. Περιοχή μελέτης σε αυτή την εργασία είναι το νησί της Κρήτης. Οι βροχοπτώσεις που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν σε μετρήσεις βροχομετρικών σταθμών σε διάφορες περιοχές της Κρήτης. Για την επεξεργασία και εξαγωγή των χαρακτηριστικών των υφέσεων χρησιμοποιήθηκαν πλεγματικά δεδομένα ανάλυσης $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, ERA-INTERIM του Ευρωπαϊκού Μετεωρολογικού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων (ECMWF). Επίσης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα κεραυνών από το Παγκόσμιο Δίκτυο Καταγραφής Ηλεκτρικών Εκκενώσεων (GLN).

Η θέση και η προέλευση των υφέσεων αλλά και δυναμικά χαρακτηριστικά τους όπως η ακτίνα, το βάθος, η πίεση, η ένταση και η ταχύτητα αναλύθηκαν και συσχετίστηκαν με την ένταση διαφορετικών βροχοπτώσεων. Με αξιοποίηση των χαρακτηριστικών των υφέσεων σχεδιάστηκε ένα απλό πιθανοτικό μοντέλο πρόβλεψης της βροχόπτωσης. Έγινε αξιολόγηση της προγνωστικής δυναμικής του μοντέλου πάνω σε τυχαία δείγματα υφέσεων. Μελετήθηκε επίσης η δραστηριότητα των κεραυνών και κατά πόσο αυτοί συσχετίζονται με τη βροχή. Στη συνέχεια εξετάστηκαν δύο τεχνικές που βασίζονται σε διαφορετική προσέγγιση: στην πρώτη το κέντρο της ανάλυσης αποτελεί ο σταθμός καταγραφής της βροχής ενώ στη δεύτερη το 'νέφος' των κεραυνών.

Τα χαρακτηριστικά των υφέσεων προκύπτει ότι συσχετίζονται με την ένταση της βροχής. Η περιοχή που εξελίσσεται η ύφεση αλλά και τυχόν ακραίες τιμές στις δυναμικές παραμέτρους της σηματοδοτούν αντίστοιχα γεγονότα βροχής. Για τους κεραυνούς, βρέθηκε ότι η πιθανότητα να έχουμε βροχή κοντά σε 'νέφος' κεραυνών είναι αυξημένη, όπως επίσης και ότι ο αριθμός των κεραυνών έχει καλή συσχέτιση με την ένταση της βροχής.

Abstract

Extreme rainfall comprises a major socio-economic threat in modern societies. The cyclone and lightning activity is associated with extreme rainfall in many cases. Intense precipitation and floods are frequently related to cyclone passages, especially in the Mediterranean region. Also, thunderstorms are frequently responsible for intense rain events.

In this work extreme hydro-meteorological events in eastern Mediterranean region are studied. More specifically, the correlation between intense rainfall, with cyclones for the period 1979-2011, and with lightning for the period 2012-2014 is investigated. The case study focuses in Crete Island, Greece. Rain is recorded in meteorological stations in various locations over Crete. For the cyclones, gridded data of high spatial resolution $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ mean sea level pressure (MSLP) ERA-INTERIM of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), are used. Also, lightning data from the Global Lightning Network (GLN) are used.

The characteristics of the cyclones in the region of eastern Mediterranean related with rain events of different intensity are studied. The position, the origination as well as the dynamic characteristics of the cyclones such as the radius, the depth, the pressure, the intensity and the velocity are analyzed and correlated with the rain intensity. Taking into account the cyclone characteristics, a simple model for rain prediction is developed. The rain prediction model is evaluated on random cyclone samples. The lightning flashes and their relation to rain is also investigated. Two different methodologies are examined, the center of analysis in the first case is the lightning cluster center and in the second is the meteorological station location.

The cyclone characteristics are found to be correlated with the rain intensity. The region of the cyclone evolution as well as the dynamic parameters of the cyclones are correlated with the corresponding rain events. As far as lightning is concerned, it is found that there is an increased probability of rain in an area around the lightning cluster. Moreover, the number of lightning flashes has a good correlation with the amount of rain.

Αφιερωμένη στην αγαπημένη μου οικογένεια...

“Learn the rules like a pro, so you can break them like an artist.”

Pablo Picasso

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θέλω να ευχαριστήσω όλους αυτούς που με βοήθησαν στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας με τις χρήσιμες συμβουλές τους αλλά και με την ένθερμη υποστήριξή τους.

Πρώτα από όλα θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου Dr. Τσάνη Ιωάννη για τις πολύ χρήσιμες συμβουλές του καθόλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας καθώς και για την αμέριστη εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου. Ακόμα, πολύ σημαντική ήταν η συμβολή της Dr. Φλόκα Έλενας, κυρίως στο μετεωρολογικό κομμάτι αυτής της διδακτορικής διατριβής, με την οποία η συνεργασία μας οδήγησε στην από κοινού έκδοση σχετικής δημοσίευσης. Επίσης, ευχαριστώ πολύ την τριμελή επιτροπή μου για την πολύτιμη καθοδήγηση και συμβουλευτική τους όπως επίσης και ολόκληρη εφταμελή επιτροπή για τη συμμετοχή της στην τελεσφόρηση αυτής της προσπάθειας.

Μεγάλη συμβολή στον ερευνητικό προσανατολισμό μου είχε επίσης ο Dr. Κουτρούλης Αριστείδης με τον οποίο είχαμε μια άριστη συνεργασία. Οι συνάδελφοί μου Dr. Γρυλλάκης Εμμανουήλ, Dr. Δαλιακόπουλος Ιωάννης και κ. Σειραδάκης Κωσταντίνος ήταν επίσης σπουδαίοι συνεργάτες σε ερευνητικό και τεχνικό επίπεδο. Πρέπει επίσης να ευχαριστήσω και όλους τους υπόλοιπους συναδέλφους του εργαστηρίου «Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Παράκτιας Μηχανικής» (Hydromech) με τους οποίους είχαμε μια άριστη συνεργασία και από τους οποίους είχα όλη την υποστήριξη.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια και τον άντρα μου οι οποίοι πάντα στη ζωή μου με στηρίζουν με όλη τους τη δύναμη και με εμπνέουν να προχωρώ και να γίνομαι καλύτερη.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	9
Abstract	10
Ευχαριστίες	15
Πίνακας περιεχομένων.....	17
Λίστα εικόνων.....	21
Λίστα πινάκων	23
1 Εισαγωγή	25
1.1 Περιγραφή του προβλήματος.....	25
1.2 Στόχοι εργασίας.....	26
1.3 Πρωτότυπα σημεία.....	27
1.4 Λίστα δημοσιεύσεων.....	28
1.5 Διάρθρωση εργασίας.....	30
2 Θεωρητικές έννοιες.....	31
2.1 Βροχή	31
2.2 Εξωτροπικές υφέσεις.....	34
2.3 Καταιγίδες-κεραυνοί	38
2.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	42
2.4.1 Υφέσεις και βροχή	42
2.4.2 Κεραυνοί και βροχή	44
3 Μέθοδοι	47
3.1 Υφέσεις και βροχή	47
3.1.1 Αλγόριθμος ανίχνευσης υφέσεων	47

Πίνακας περιεχομένων

3.1.2	Σύνδεση βροχής-υφέσεων.....	48
3.1.3	Χωρικοί χάρτες πιθανοτήτων	50
3.1.4	Προγνωστική αξιολόγηση	51
3.1.5	Πιθανοτικό μοντέλο βροχής	55
3.2	Κεραυνοί και βροχή	56
3.2.1	Περιοχή αναζήτησης.....	56
3.2.2	Μέθοδοι ομαδοποίησης	57
3.2.3	Μέθοδος χωροχρονικής ομαδοποίησης κεραυνών	59
3.2.4	Συσχέτιση ποσότητας βροχής-αριθμού κεραυνών	60
4	Δεδομένα και περιοχή μελέτης	63
4.1	Δεδομένα	63
4.1.1	Υφέσεις και βροχή	63
4.1.2	Κεραυνοί και βροχή.....	64
4.2	Περιοχή μελέτης.....	65
5	Αποτελέσματα.....	67
5.1	Υφέσεις και βροχή	67
5.1.1	Βροχές που προκλήθηκαν από υφέσεις	67
5.1.2	Τα χαρακτηριστικά των ενεργών και επιδρώντων υφέσεων	68
5.1.3	Η προέλευση και η θέση των ενεργών και επιδρώντων υφέσεων	76
5.1.4	Χωρική κατανομή των ενεργών και επιδρώντων υφέσεων	79
5.1.5	Πιθανοτικοί χάρτες	80
5.1.6	Αξιολόγηση των πιθανοτικών χαρτών.....	86
5.1.7	Αξιολόγηση των πιθανοτικών χαρτών σε γεγονότα πλημμύρας	90
5.2	Κεραυνοί και βροχή	94
5.2.1	Χωροχρονική ομαδοποίηση κεραυνών.....	94

Πίνακας περιεχομένων

5.2.2	Σχέση κεραυνών και βροχόπτωσης	100
5.2.3	Μέση συσχέτιση βροχής-κεραυνών.....	102
5.2.4	Μέση συσχέτιση βροχής-κεραυνών ανά σταθμό.....	103
5.2.5	Μελέτη περιπτώσεων έντονης βροχής.....	107
6	Συμπεράσματα & μελλοντική έρευνα.....	111
6.1	Υφέσεις και βροχή	111
6.2	Κεραυνοί και βροχή	112
6.3	Μελλοντική έρευνα	114
7	Παράρτημα.....	117
7.1	Συμπληρωματικές πληροφορίες για τις υφέσεις που σχετίζονται με βροχή στην Κρήτη 117	
7.2	Οι δημοσιεύσεις	122
8	Βιβλιογραφία	161

Λίστα εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 2.1: ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΗ ΓΙΑ ΤΑ ΕΤΗ 1940-1995 ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΗΣ (NIXON ET AL. 2003).	33
ΕΙΚΟΝΑ 2.2: ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΥΠΟΤΡΟΠΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝΩΝ (GOVORUSHKO 2012).	35
ΕΙΚΟΝΑ 2.3: Ο ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΤΗΣ ΥΦΕΣΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΝΟΡΒΗΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ (LUTGENS AND TARBUCK 2013).	36
ΕΙΚΟΝΑ 2.4: ΧΑΡΤΗΣ ΤΩΝ ΥΦΕΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΝΕΜΩΝ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΝΤΑΙ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ ΤΟ ΧΕΙΜΩΝΑ (CHATZIALEKOU 2016).	37
ΕΙΚΟΝΑ 2.5: Η ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΕΡΑΥΝΩΝ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 1998-2013 ΑΠΟ ΤΟΝ NASA/MSFC ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΚΕΡΑΥΝΩΝ.	39
ΕΙΚΟΝΑ 2.6: Η ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΕΡΑΥΝΩΝ ΣΤΟΝ ΕΥΡΥΤΕΡΟ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2005-2014 ΟΠΩΣ ΕΧΕΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΙ ΑΠΟ ΤΟ ΜΕΤΕΟ (TALOS PROJECT).	40
ΕΙΚΟΝΑ 3.1: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΤΗΣ ΥΦΕΣΗΣ (LIM AND SIMMONDS 2007).	48
ΕΙΚΟΝΑ 3.2: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΤΗΣ ΥΦΕΣΗΣ (LIM AND SIMMONDS 2007).	48
ΕΙΚΟΝΑ 3.3: Ο ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΜΕΝΗΣ ΕΠΙΚΥΡΩΣΗΣ ΣΕ Κ ΜΕΡΗ (K-FOLD CROSS VALIDATION) (BOROVICKA ET AL. 2012).	52
ΕΙΚΟΝΑ 3.4: ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΒΡΟΧΗΣ.	55
ΕΙΚΟΝΑ 3.5: ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΒΡΟΧΗΣ-ΚΕΡΑΥΝΩΝ. ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΣΑΡΩΝΕΤΑΙ Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗ ΣΥΣΤΑΔΑ ΚΕΡΑΥΝΩΝ ΓΙΑ ΕΥΡΕΣΗ ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ. ΔΕΞΙΑ ΣΑΡΩΝΕΤΑΙ Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟ ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΟ ΣΤΑΘΜΟ ΓΙΑ ΑΝΕΥΡΕΣΗ ΚΕΡΑΥΝΩΝ.	57
ΕΙΚΟΝΑ 3.6: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΟΥ ΑΦΟΡΑ ΣΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ (KOUTROULIS ET AL. 2012).	62
ΕΙΚΟΝΑ 4.1: Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΟΙ ΤΟΜΕΙΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.	64
ΕΙΚΟΝΑ 5.1: ΤΑ ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΣΤΙΣ ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΤΩΝ ΥΦΕΣΕΩΝ (ΠΙΕΣΗ, ΕΝΤΑΣΗ, ΒΑΘΟΣ, ΑΚΤΙΝΑ, ΤΑΧΥΤΗΤΑ) ΠΟΥ ΒΡΙΣΚΟΝΤΑΙ ΣΕ ΘΕΣΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΚΡΗΤΗ ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ 1979-2011.	70
ΕΙΚΟΝΑ 5.2: ΕΤΗΣΙΑ ΚΑΙ ΕΠΟΧΙΑΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΕΠΙΔΡΩΝΤΩΝ ΥΦΕΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ 1979-2011 ΣΕ BOX-WHISKER ΜΟΡΦΗ.	72
ΕΙΚΟΝΑ 5.3: ΕΠΟΧΙΚΗ ΚΑΙ ΕΤΗΣΙΑ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΩΝ ΥΦΕΣΕΩΝ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΟΜΕΑ ΠΟΥ ΕΧΕΙ ΘΕΩΡΗΘΕΙ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΡΗΤΗ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 1979-2011.	75
ΕΙΚΟΝΑ 5.4: ΕΤΗΣΙΕΣ ΚΑΙ ΕΠΟΧΙΑΚΕΣ ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ (%) ΤΗΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΩΝ ΥΦΕΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ 1979-2011.	78
ΕΙΚΟΝΑ 5.5: ΕΤΗΣΙΕΣ ΚΑΙ ΕΠΟΧΙΑΚΕΣ ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ (%) ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΩΝ ΕΠΙΔΡΩΝΤΩΝ ΥΦΕΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ 1979-2011.	79
ΕΙΚΟΝΑ 5.6: Ο ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΩΝΤΩΝ ΥΦΕΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ 1979-2011 ΓΙΑ Α1) ΜΕΣΗ, Α2) ΕΝΤΟΝΗ ΚΑΙ Α3) ΣΦΟΔΡΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ.	80
ΕΙΚΟΝΑ 5.7: ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ Α) ΑΠΛΟΣ ΚΑΙ Β) WNP ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΠΙΔΡΩΝΤΕΣ ΥΦΕΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 1979-2011 ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΕΣΑΝ 1) ΜΕΣΗ, 2) ΕΝΤΟΝΗ ΚΑΙ 3) ΣΦΟΔΡΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ.	83

Λίστα εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 5.8: ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ Α) ΑΠΛΟΣ ΚΑΙ Β) WNP ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΝΕΡΓΕΣ ΥΦΕΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 1979-2011 ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΕΣΑΝ 1) ΜΕΣΗ, 2) ΕΝΤΟΝΗ ΚΑΙ 3) ΣΦΟΔΡΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ	84
ΕΙΚΟΝΑ 5.9: ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΑΚΡΑΙΕΣ ΕΝΕΡΓΕΣ ΥΦΕΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 1979-2011 ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΕΣΑΝ 1) ΜΕΣΗ, 2) ΕΝΤΟΝΗ ΚΑΙ 3) ΣΦΟΔΡΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ. ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΑ ΟΠΟΙΑ ΕΠΙΛΕΧΘΗΚΑΝ ΟΙ ΑΚΡΑΙΕΣ ΥΦΕΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ Α) ΤΟ ΒΑΘΟΣ, Β) Η ΑΚΤΙΝΑ ΚΑΙ Γ) Η ΕΝΤΑΣΗ ΤΟΥΣ.....	85
ΕΙΚΟΝΑ 5.10: ΤΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΤΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ (ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ, ΕΙΔΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΚΡΙΒΕΙΑ) ΤΩΝ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΤΩΝ (NoC _{RI} , 3C _{RI} , WN, WN3C _{RI} , NoC _{RI} +WN). ΣΕ ΠΑΡΕΝΘΕΣΗ ΣΤΗΝ ΚΟΡΥΦΗ ΤΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ Η ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΙΜΗ ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΠΟΙΑ ΒΡΕΘΗΚΑΝ ΤΑ ΕΙΚΟΝΙΖΟΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.	88
ΕΙΚΟΝΑ 5.11: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΤΩΝ ΓΙΑ ΕΝΑ ΓΕΓΟΝΟΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΣΤΙΣ 17/10/2006 ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΛΜΥΡΙΔΑΣ.....	89
ΕΙΚΟΝΑ 5.12: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΤΩΝ ΠΑΝΩ ΣΤΑ ΓΕΓΟΝΟΤΑ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΠΟΥ ΣΥΝΟΨΙΖΟΝΤΑΙ ΣΤΟΝ ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5.	93
ΕΙΚΟΝΑ 5.13: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΤΗΣ ΠΟΡΕΙΑΣ ΜΙΑ ΤΥΠΙΚΗΣ ΚΑΤΑΓΙΔΑΣ ΣΤΙΣ 16/11/2012. ΟΙ ΚΕΡΑΥΝΟΙ ΣΕ ΚΑΘΕ ΕΙΚΟΝΑ ΑΦΟΡΟΥΝ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 6 ΩΡΩΝ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ Η ΒΡΟΧΗ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΣΤΑΘΜΟ ΕΧΕΙ ΑΘΡΟΙΣΤΕΙ ΓΙΑ 6 ΩΡΕΣ.....	96
ΕΙΚΟΝΑ 5.14: : ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗΣ ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΚΕΡΑΥΝΩΝ ΓΙΑ ΕΝΑ ΓΕΓΟΝΟΣ ΙΣΧΥΡΗΣ ΒΡΟΧΗΣ ΣΤΙΣ 16/11/2012. ..	97
ΕΙΚΟΝΑ 5.15: ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΟΜΑΔΩΝ ΚΕΡΑΥΝΩΝ. ΣΤΗΝ ΑΡΙΣΤΕΡΗ ΣΤΗΛΗ ΟΙ ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΓΙΑ ΟΜΑΔΕΣ ΠΟΥ ΣΥΝΔΕΟΝΤΑΙ ΜΕ ΓΕΓΟΝΟΤΑ ΒΡΟΧΗΣ ΑΝΩ ΤΩΝ 10.6 ΜΜ/Η, 5 ΜΜ/Η ΚΑΙ 0 ΜΜ/Η ΚΑΙ ΣΤΗ ΔΕΞΙΑ ΣΤΗΛΗ Η ΔΙΑΦΟΡΑ ΤΩΝ ΟΜΑΔΩΝ ΣΤΑ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.	98
ΕΙΚΟΝΑ 5.16: Η ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΜΙΑ ΟΜΑΔΑ ΚΕΡΑΥΝΩΝ ΝΑ ΣΥΜΠΙΠΤΕΙ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΩΡΙΑΙΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΤΩΝ 5ΜΜ/Η (95 ^ο ΕΚΑΤΟΣΤΗΜΟΡΙΟ), ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΚΑΙ ΤΟΝ ΑΡΙΘΜΟ ΤΩΝ ΚΕΡΑΥΝΩΝ.	99
ΕΙΚΟΝΑ 5.17: Η ΜΕΣΗ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΣΥΜΠΤΩΣΗΣ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ ΩΡΙΑΙΑΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ 99 ^ο , 95 ^ο ΚΑΙ 90 ^ο ΕΚΑΤΟΣΤΗΜΟΡΙΟΥ ΜΕ ΚΕΡΑΥΝΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ.	101
ΕΙΚΟΝΑ 5.18: Ο ΜΕΣΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΧΡΟΝΙΚΕΣ ΥΣΤΕΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΘΥΡΑ ΓΙΑ Α) ΤΟ 99 ^ο ΕΚΑΤΟΣΤΗΜΟΡΙΟ ΤΗΣ ΒΡΟΧΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ ΑΡΙΘΜΟ ΚΕΡΑΥΝΩΝ, Β) ΓΙΑ ΠΑΝΩ ΑΠΟ 10 ΚΕΡΑΥΝΟΥΣ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΕΚΑΤΟΣΤΗΜΟΡΙΑ ΒΡΟΧΗΣ.	103
ΕΙΚΟΝΑ 5.19: Ο ΜΕΣΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟ 90 ^ο , 95 ^ο ΚΑΙ 99 ^ο ΕΚΑΤΟΣΤΗΜΟΡΙΟ ΤΗΣ ΒΡΟΧΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΟΥ ΟΤΙ ΥΠΑΡΧΟΥΝ ΑΝΩ ΤΩΝ 10 ΚΕΡΑΥΝΟΙ.	105
ΕΙΚΟΝΑ 5.20: Ο ΜΕΣΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΟΥΣ ΑΠΟ 0, 5 ΚΑΙ 10 ΚΕΡΑΥΝΟΥΣ ΓΙΑ ΤΟ 99 ^ο ΕΚΑΤΟΣΤΗΜΟΡΙΟ ΤΗΣ ΒΡΟΧΗΣ.	106
ΕΙΚΟΝΑ 5.21: Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΜΕΤΑΞΥ ΒΡΟΧΗΣ ΚΑΙ ΚΕΡΑΥΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΩΡΙΑΙΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΚΑΘΕ ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ.....	108
ΕΙΚΟΝΑ 5.22: Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΑ ΠΙΟ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΕΓΟΝΟΤΑ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑ 5.21 ΜΕ ΤΑ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΑ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ (95%, ΠΡΑΣΙΝΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ).	109
ΕΙΚΟΝΑ 7.1: ΟΙ ΤΡΟΧΙΕΣ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΩΝ ΥΦΕΣΕΩΝ (ΓΙΑ ΒΡΟΧΗ >10ΜΜ/DAY) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 1979-2011 ΧΩΡΙΣΜΕΝΟΙ ΣΕ ΧΩΡΙΚΕΣ ΟΜΑΔΕΣ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΟΥΣ.	118
ΕΙΚΟΝΑ 7.2: ΟΙ ΕΝΕΡΓΕΣ ΥΦΕΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 1979-2011 ΧΩΡΙΣΜΕΝΕΣ ΣΕ ΧΩΡΙΚΕΣ ΟΜΑΔΕΣ.....	120

Λίστα πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1: ΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΥΦΕΣΕΩΝ.....	53
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2: ΕΞΗΓΗΣΗ ΤΩΝ ΟΡΩΝ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΟΠΟΙΟΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΝΤΑΙ ΤΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΜΕΤΡΑ ΤΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ, ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ.	54
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΗΣΗΣ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΤΙΜΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ.....	61
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1: ΟΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΒΡΟΧΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ (ΚΡΗΤΗ).....	67
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2: ΤΑ ΓΕΓΟΝΟΤΑ ΒΡΟΧΗΣ ΣΤΗΝ ΚΡΗΤΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 1979-2011. ΟΙ ΜΗ ΧΡΩΜΑΤΙΣΜΕΝΕΣ ΣΤΗΛΕΣ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΑ ΓΕΓΟΝΟΤΑ ΒΡΟΧΗΣ ΚΑΙ ΟΙ ΓΚΡΙ ΣΤΗΛΕΣ ΤΗ ΣΧΕΤΙΚΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (%) ΣΥΜΠΤΩΣΗΣ ΒΡΟΧΗΣ-ΥΦΕΣΗΣ.	67
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3: ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΩΝ ΒΡΟΧΗΣ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΕΠΙΔΡΩΝΤΩΝ ΥΦΕΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ 1979-2011. ΜΕ ΓΚΡΙ ΦΟΝΤΟ ΣΗΜΕΙΩΝΟΝΤΑΙ ΟΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΟΥ ΔΕΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑΖΟΥΝ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΟ 90% Η 95% ΕΠΙΠΕΔΟ. ΜΕ 1 ΣΗΜΕΙΩΝΟΝΤΑΙ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΟ 95% ΕΝΩ ΜΕ 0 ΑΥΤΑ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΟ 90%.	73
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4: ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΕΠΟΧΩΝ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΕΠΙΔΡΩΝΤΩΝ ΥΦΕΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ 1979-2011. ΜΕ ΓΚΡΙ ΦΟΝΤΟ ΣΗΜΕΙΩΝΟΝΤΑΙ ΟΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΟΥ ΔΕΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑΖΟΥΝ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΟ 90% Η 95% ΕΠΙΠΕΔΟ. ΜΕ 1 ΣΗΜΕΙΩΝΟΝΤΑΙ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΟ 95% ΕΝΩ ΜΕ 0 ΑΥΤΑ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΟ 90% ΕΠΙΠΕΔΟ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.	74
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5: ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΒΡΟΧΗΣ ΠΟΥ ΟΔΗΓΗΣΑΝ ΣΕ ΠΛΗΜΜΥΡΑ ΠΑΝΩ ΣΤΙΣ ΟΠΟΙΕΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΘΗΚΑΝ ΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ.....	92
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1: Ο ΑΡΙΘΜΟΣ ΥΦΕΣΕΩΝ ΑΝΑ ΟΜΑΔΑ ΚΑΙ Η ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΟΙ ΥΦΕΣΕΙΣ ΠΟΥ ΠΕΡΝΟΥΝ ΣΕ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΟΥ CLUSTER ΝΑ ΕΙΝΑΙ ΕΝΕΡΓΕΣ.	119
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.2: Η ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΟΙ ΥΦΕΣΕΙΣ ΠΟΥ ΠΕΡΝΟΥΝ ΣΕ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΗΣ ΟΜΑΔΑΣ ΝΑ ΕΙΝΑΙ ΕΝΕΡΓΕΣ.	121

1 Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του προβλήματος

Η εκδήλωση ακραίων βροχοπτώσεων συνδέεται με πολυάριθμα προβλήματα κοινωνικοοικονομικού ενδιαφέροντος όπως πλημμύρες, κατολισθήσεις, οδικά ατυχήματα κ.α. Για το λόγο αυτό, πλήθος μελετητών έχουν ασχοληθεί με διαφορετικές υδρομετεωρολογικές παραμέτρους που συνδέονται με τη βροχόπτωση και που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως προγνωστικό μέσο.

Τόσο οι υφέσεις όσο και οι κεραυνοί έχουν συνδεθεί σε πολλές επιστημονικές μελέτες με την εκδήλωση έντονων βροχοπτώσεων. Η σύνθετη τοπογραφία της Μεσογείου η οποία χαρακτηρίζεται από έντονη ορεογραφία και δαιδαλώδεις ακτογραμμές, ευνοεί το σχηματισμό υφέσεων (Trigo et al. 1999; Lionello et al. 2006; Sanna et al. 2013). Οι υφέσεις σχετίζονται με τη βροχόπτωση κυρίως στην περιοχή της Μεσογείου, όπου δημιουργώντας έντονες ανοδικές κινήσεις σε συνδυασμό με την υγρασία τροφοδοτούν τα συστήματα που οδηγούν σε βροχόπτωση (Campins et al. 2011; Reale and Lionello 2013). Ειδικότερα, οι Μεσογειακές υφέσεις είναι υπεύθυνες για την πλειοψηφία των ακραίων φαινομένων του καιρού και παίζουν σημαντικό ρόλο τόσο στο χρόνο εκδήλωσής τους, όσο και στη διαμόρφωση των ακραίων τιμών (Lionello et al. 2006).

Οι κεραυνοί έχουν επίσης μελετηθεί από πληθώρα ερευνητών σχετικά με τη συσχέτιση που έχουν με την έντονη βροχόπτωση. Έχει διαπιστωθεί από τη μελέτη τους ότι μια καλύτερη κατανόηση της σχέσης τους θα μπορούσε να βελτιώσει την ολιστική αντίληψη των καταγίδων και της βραχυπρόθεσμης πρόβλεψής τους (Petrova et al. 2014; Siingh et al. 2014).

Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψιν την αναγκαιότητα για πρόβλεψη γεγονότων έντονης βροχόπτωσης εξαιτίας των οδυνηρών επιπτώσεων που μπορούν αυτά να έχουν στις κοινωνικοοικονομικές δομές και με γνώμονα τον καθοριστικό ρόλο που παίζουν οι υφέσεις και οι κεραυνοί στην εκδήλωση τέτοιων γεγονότων, η εξέταση της συσχέτισης της βροχής με τις υφέσεις και τους κεραυνούς κρίνεται εξαιρετικά ενδιαφέρονσα.

1.2 Στόχοι εργασίας

Ο βασικός στόχος της εργασίας είναι η μελέτη ακραίων υδρομετεωρολογικών φαινομένων στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου και ειδικότερα στην Κρήτη. Αναλυτικότερα οι στόχοι της εργασίας αυτής έχουν ως εξής:

- Διερεύνηση της συσχέτισης σημαντικών μετεωρολογικών παραμέτρων όπως οι υφέσεις και οι κεραυνοί με τη βροχή και ειδικότερα με την ακραία εκδήλωση αυτής.
- Ανάπτυξη μεθόδων για τη μακροπρόθεσμη και μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη της ακραίας βροχόπτωσης.
- Μελέτη των διαφορών στα χαρακτηριστικά των υφέσεων και των κεραυνών σε περιπτώσεις βροχόπτωσης διαφορετικής έντασης.
- Αξιοποίηση τεχνικών στατιστικής μελέτης σε μετεωρολογικές παραμέτρους (υφέσεις, κεραυνούς) για εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν στη βροχή.
- Δημιουργία απλού μοντέλου το οποίο με ελάχιστο υπολογιστικό κόστος και μικρές απαιτήσεις σε όγκο δεδομένων θα μπορεί να δίνει προειδοποίηση για ακραία βροχόπτωση.

1.3 Πρωτότυπα σημεία

Τα πρωτότυπα σημεία της εργασίας αφορούν στους τομείς της βασικής έρευνας, της εφαρμοσμένης έρευνας και της ανάπτυξης εφαρμογών. Αυτά συνοψίζονται ως εξής:

Βασική έρευνα:

- Συσχέτιση των χαρακτηριστικών των υφέσεων με την ένταση της βροχόπτωσης.
- Εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων για τη συσχέτιση των κεραυνών με την ένταση της βροχόπτωσης.

Εφαρμοσμένη έρευνα:

- Επεξεργασία και ανάλυση χρονοσειρών βροχής από διαφορετικούς βροχομετρικούς σταθμούς στην Κρήτη.
- Επεξεργασία και ανάλυση υφέσεων όπως αυτές προκύπτουν από το μοντέλο ανίχνευσης υφέσεων του πανεπιστημίου της Μελβούρνης με δεδομένα ατμοσφαιρικής πίεσης (Mean Sea Level Pressure - MSLP) reanalysis ERA-INTERIM της ECMWF.
- Μελέτη ακραίων υδρομετεωρολογικών φαινομένων στη Μεσόγειο.
- Ανάπτυξη ενός εύκολου στη χρήση πιθανοτικού μοντέλου πρόβλεψης βροχής το οποίο χρησιμοποιεί μόνο πληροφορία που αφορά σε διαφορετικές παραμέτρους των υφέσεων.

Ανάπτυξη εφαρμογών:

- Ανάπτυξη εφαρμογών για την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων βροχής, κεραυνών και υφέσεων σε MATLAB.
- Ανάπτυξη εφαρμογών για την εξαγωγή των υφέσεων και χρήση του λογισμικού εντοπισμού υφέσεων και κυκλωνικών τροχιών της Μελβούρνης σε C Shell Script, Bash script, Python.
- Ανάπτυξη εφαρμογών για οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων σε Matlab, ArcGIS, Excel.

1.4 Λίστα δημοσιεύσεων

Δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά (Journal articles):

- Iordanidou, V., Koutroulis, A.G. and Tsanis, I.K., “Investigating the relationship of lightning activity and rainfall: A case study for Crete island”, *Atmospheric Research*, 172–173:16–27, 2016.
- Flocas, H., Tsanis, I.K., Katavoutas, G., Kouroutzoglou, J., Iordanidou, V., Alexakis, D.D., “Climatological aspects of cyclonic tracks associated with flood events in Crete, Greece,” *Theoretical and Applied Climatology*, September 2016.
- Iordanidou, V., Koutroulis, A.G., Tsanis, I.K., “Mediterranean depression characteristics related to precipitation occurrence in Crete, Greece”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, August 2015.
- Iordanidou, V., Koutroulis, A.G., Tsanis I.K., “Cyclone-precipitation analysis for the island of Crete”, *Journal of the Black Sea/Mediterranean Environment*, 21, 70-73, Special Issue, 2015.
- Iordanidou, V., Koutroulis, A.G., Tsanis, I.K., “A Probabilistic Rain Diagnostic Model Based on Cyclone Statistical Analysis”, *Advances in Meteorology*, Vol. 2014, Article ID: 498020, 11 pages, June 2014.
-

Δημοσιεύσεις σε συνέδρια με κριτές (Peer-reviewed conference proceedings):

- Iordanidou V., Koutroulis A.G., Tsanis I.K., Is rainfall intensity in thundery weather related to lightning flashes? 2nd EWaS International Conference, June 1-4, Chania, Greece, 2016.
- Iordanidou V., Koutroulis A., Tsanis I.K., “Investigating correlation of lighting activity and precipitation in an Eastern Mediterranean island”, EGU2015-9833, Vienna, Austria, 12-17 April 2015 (poster).
- Tsanis, I.K., Flocas, H., Alexakis, D.D., Vozinaki, A-E.K., Katavoutas, G., Iordanidou, V., Palogos, I., Giannakis, G., Panakoulia, S., Morianou, G., Pappa, P., Papadakis, V., “Remote Sensing Meteorological Data Fusion for effective flood mitigation and forecasting over Mediterranean” EWRA 2015, Istanbul, Turkey, 10-13 June 2015.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

- Flocas H., Katavoutas G., Tsanis I.K., Iordanidou V., (2015) “On the dynamics of synoptic scale cyclones associated with flood events in Crete”, EGU2015-11307, Vienna, Austria, 12-17 April 2015 (poster).
- Iordanidou V., Koutroulis A.G., Tsanis I.K., “Diagnosis of rainfall occurrence with the evaluation of Cyclone Probability Maps over Eastern Mediterranean”, EGU2014-3947, Vienna 2014 (poster).
- Iordanidou V., Koutroulis A.G., Tsanis I.K., Flocas H.A., “Qualitative Features of Cyclones triggering high precipitation events in the Island of Crete, Eastern Mediterranean.”, EGU2013-4410, Vienna, Austria, 07 – 12 April 2013.

Τεχνικές εκθέσεις:

Συμμετοχή στη συγγραφή παραδοτέων του “**REINFORCE**: Remote sEnsing meteorologIcal data fusioN for effective Flood mitigatiOn and foReCasting over Eastern Mediterranean, GSRT, ARISTEIA II Action, Greece (2014-2015)”, με επιστημονικό υπεύθυνο τον Dr. Τσάνη Ιωάννη.

1.5 Διάρθρωση εργασίας

Μέχρι αυτό το σημείο (στο **πρώτο κεφάλαιο**), έχει γίνει μια εισαγωγή στο πρόβλημα που μελετάται σε αυτή τη διδακτορική διατριβή, στους στόχους και τα πρωτότυπα σημεία αυτής. Επίσης, παρουσιάστηκαν οι δημοσιεύσεις που έγιναν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο**, παρουσιάζονται οι θεωρητικές έννοιες που σχετίζονται με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Σε αυτό αναλύονται οι έννοιες της βροχής, των υποτροπικών κυκλώνων και των κεραυνών. Στη συνέχεια, γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με την έρευνα που έχει γίνει και αφορά τη συσχέτιση των υφέσεων και των κεραυνών με τη βροχόπτωση.

Στο **τρίτο κεφάλαιο**, παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν. Στο **τέταρτο κεφάλαιο**, παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία. Εκεί γίνεται αναφορά στις επιμέρους μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για τις υφέσεις και τους κεραυνούς και τη συσχέτιση αυτών με τη βροχόπτωση.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο**, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των επιμέρους μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν. Παρουσιάζονται οι διαφορές των συστημάτων υφέσεων που σχετίζονται με την ένταση της βροχής και τα αποτελέσματα του μοντέλου μακροπρόθεσμης πρόβλεψης της βροχής με χρήση χαρτών πιθανοτήτων, χρησιμοποιώντας την πληροφορία που δίνουν οι υφέσεις. Σχετικά με τους κεραυνούς, παρουσιάζεται η συσχέτιση των κεραυνών με τη βροχή με τη χρήση δύο διαφορετικών προσεγγίσεων (ως μονάδες και ως ομάδες κεραυνών).

Στο **έκτο κεφάλαιο**, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις διαφορετικές μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή, ενώ παράλληλα προτείνονται πιθανά θέματα μελλοντικής έρευνας.

2 Θεωρητικές έννοιες

2.1 Βροχή

Τα κατακρημνίσματα ή υδρομετέωρα ή υετός αποτελούν το συνολικό νερό που καταλήγει στη γη από τα σύννεφα σε υγρή (βροχή, κ.α.) ή στερεά μορφή (χιόνι, χαλάζι, κ.α.). Η δημιουργία της βροχής προκύπτει όταν υδροσταγονίδια ή παγοκρύσταλλοι του νέφους έχουν μέγεθος ικανό ώστε ξεπερνώντας την άνωση να πέφτουν προς το έδαφος. Εάν οι υδροσταγόνες διατηρήσουν την υγρή τους μορφή πριν φτάσουν στην επιφάνεια της γης, παρατηρείται το φαινόμενο της βροχής. Η βροχή αποτελεί το κυριότερο υγρό κατακρήμνισμα από τα σύννεφα σε μορφή σταγόνας 0.5mm ή μεγαλύτερης διαμέτρου. Το μέγεθος των βροχοσταγόνων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως την εξάτμιση που συμβαίνει κατά τη διαδρομή της βροχοσταγόνας, το αρχικό της μέγεθος και τα καθοδικά ρεύματα αέρα.

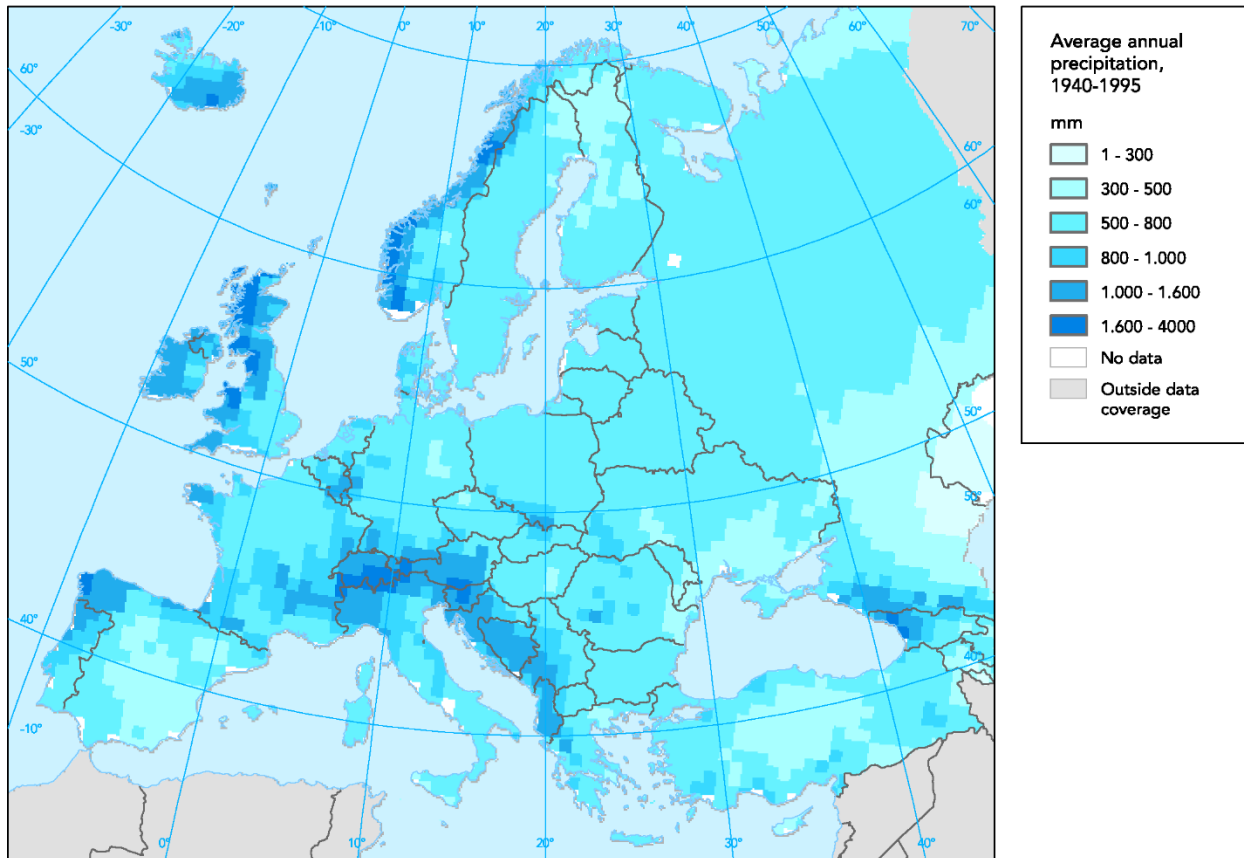
Οι κύριες κατηγορίες της βροχής είναι τρεις και συνοψίζονται σε: βροχές κατακόρυφης μεταφοράς (convective rain), μετωπικές βροχές και ορογραφικές ή ανάγλυφου. Οι βροχές κατακόρυφης μεταφοράς προκύπτουν όταν λόγω της θέρμανσης των κατώτερων στρωμάτων προκύπτει μεταφορά υδρατμών σε μεγαλύτερα ύψη όπου η αστάθεια του αέρα μπορεί να οδηγήσει σε συμπυκνώσεις. Όταν ο θερμός αέρας συναντά τον ψυχρό αέρα των υψηλότερων στρωμάτων της ατμόσφαιρας, ανέρχεται ακόμα ψηλότερα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία σύννεφων κατακόρυφης ανάπτυξης από τα οποία συνήθως προκύπτουν μικρής διάρκειας αλλά μεγάλης σφοδρότητας βροχοπτώσεις. Οι μετωπικές βροχές δημιουργούνται βασιζόμενες σε έναν αντίστοιχο μηχανισμό, που όμως αυτή τη φορά ψυχρός και υγρός ασταθής αέρας διέρχεται επάνω από θερμή επιφάνεια. Σε αυτή την περίπτωση προκαλούνται ανοδικές κινήσεις λόγω της θέρμανσης στα κατώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα, με συνέπεια την ανύψωση των υδρατμών και τη δημιουργία βροχής. Αυτό αποτελεί συχνό φαινόμενο στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη όπου συνήθως κατά τη θερμότερη περίοδο του έτους εκδηλώνεται με τη μορφή ψυχρού μετώπου (Μαχαίρας και Μπαλαφούτης 1984). Η ορογραφία έχει επίσης σημαντικό ρόλο στη δημιουργία της βροχής, με τη διάταξη και το μέγεθος αυτής να αποτελούν σημαντικούς παράγοντες. Η βροχή σε αυτή την περίπτωση εκδηλώνεται στις προσήνεμες κλιτύες του βουνού, εφόσον υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες όπως για παράδειγμα η απαιτούμενη υγρασία και η αστάθεια του αέρα. Καθώς τα νέφη υπερπηδώντας την οροσειρά έχουν συνήθως δώσει το σημαντικότερο ποσό της υγρασίας τους, η αντίθετη πλευρά του βουνού συνήθως δέχεται πολύ λιγότερες βροχές. Το φαινόμενο αυτό

ονομάζεται ομβροσκιά ή βροχοσκιά. Η ορογραφία μπορεί να οδηγήσει σε βροχή για τους παρακάτω λόγους: α) εξαιτίας του ορεινού όγκου δημιουργείται αστάθεια ή θέρμανση του αέρα, β) επηρεάζεται η βροχόπτωση ενός κυκλωνικού συστήματος με τον ορεινό όγκο να δρα επιβραδυντικά στην ταχύτητα του συστήματος, γ) ο καναλισμός των κοιλάδων συμβάλει στη δημιουργία βροχής κατακόρυφης μεταφοράς.

Η βροχόπτωση μετρίεται σε χιλιοστά ύψους του υδάτινου στρώματος σε οριζόντια επιφάνεια, όπου ποσοτικά, ένα χιλιοστό ύδατος σε επιφάνεια ενός τετραγωνικού μέτρου ισοδυναμεί με ένα λίτρο ύδατος. Η βροχή ανάλογα με το χρονικό πλαίσιο πάνω στο οποίο αθροίζεται, μπορεί να είναι ωριαία, ημερήσια, μηνιαία, ετήσια κ.α. Ανάλογα με την εφαρμογή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες χρονικές κλίμακες μέτρησης όπως τα δεκάλεπτα, το μισάωρο κ.α. Για τη μελέτη της συμπεριφοράς της βροχής χρησιμοποιείται η ένταση της βροχής, η οποία εκφράζει το ύψος της βροχής σε χιλιοστά σε καθορισμένο χρονικό διάστημα. Κάθε δευτερόλεπτο φτάνουν στη γη $14,000,000\text{m}^3$ νερού, ενώ ετησίως το μέσο πλανητικό βροχόμετρο φτάνει τα 900mm (Στάθης 2016).

Υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στη βροχόπτωση στις διαφορετικές περιοχές, ανάλογα με το μήνα, κάτι το οποίο αποτελεί βασικό κλιματικό στοιχείο της κάθε περιοχής. Η ετήσια πορεία της βροχής καλούμενη και ως βροχομετρικό σύστημα έχει τις παρακάτω βασικές κατηγορίες: α) θαλάσσιο, β) ηπειρωτικό, γ) Μεσογειακό ή υποτροπικό, δ) μουσωνικό, ε) ισημερινό και στ) τροπικό. Όπως φαίνεται και από το όνομά του το βροχομετρικό σύστημα που επικρατεί στην περιοχή της Μεσογείου είναι το Μεσογειακό. Στο Μεσογειακό βροχομετρικό σύστημα παρατηρείται θερινό ελάχιστο της βροχόπτωσης και χειμερινό μέγιστο.

Η βροχή δεν κατανέμεται ομοιόμορφα στις διαφορετικές περιοχές, αντιθέτως υπάρχει μεγάλη ανισοκατανομή η οποία οφείλεται σε πλήθος παραγόντων, όπως τοπογραφικοί και θερμοδυναμικοί. Ένα παράδειγμα όπου φαίνεται αυτή η διαφοροποίηση της κατανομής της βροχόπτωσης παρουσιάζεται στον χάρτη στην Εικόνα 2.1, όπου φαίνεται η μέση ετήσια βροχόπτωση στην Ευρώπη για τα έτη 1940-1995. Γενικά, βροχή συναντάται σε όλες τις περιοχές παγκοσμίως εκτός της Ανταρκτικής, και η τροπική ζώνη είναι η περιοχή με τις περισσότερες βροχοπτώσεις. Στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη η βροχή οφείλεται συνήθως στις εξωτροπικές υφέσεις (Jansa et al. 2001b), ενώ παράλληλα η έντονη ορογραφία αυξάνει σημαντικά την ένταση και τη συχνότητα των βροχοπτώσεων.



Εικόνα 2.1: Μέση ετήσια κατακρήμνιση για τα έτη 1940-1995 στην ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης (Nixon et al. 2003).

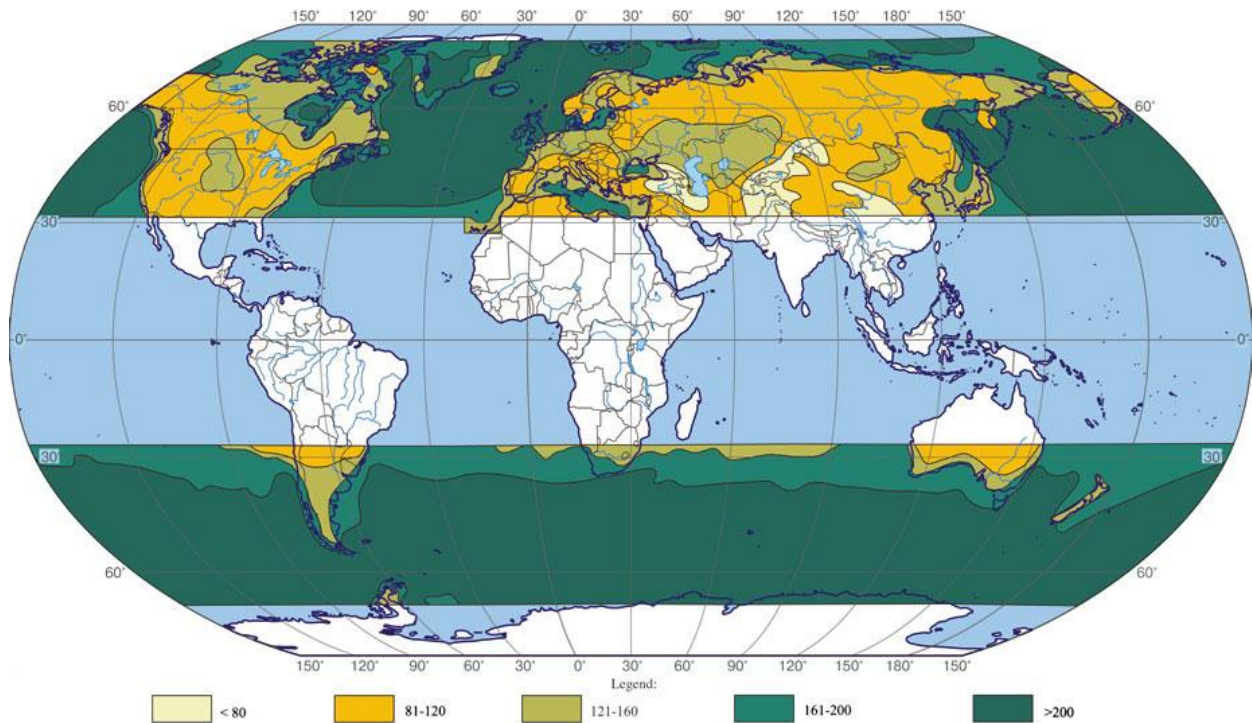
Για τη μέτρηση των κατακρημνισμάτων που φτάνουν στη γη γίνεται χρήση ειδικών οργάνων τα οποία μπορεί να είναι: α) απλά βροχόμετρα τα οποία κάνουν απλή παρατήρηση, β) βροχογράφοι οι οποίοι κάνουν αυτόματη μηχανική καταγραφή, γ) αισθητήρες και data loggers οι οποίοι κάνουν ηλεκτρονική καταγραφή για μεγαλύτερα διαστήματα και τέλος δ) πιο σύγχρονα συστήματα τα οποία αποτελούνται από ειδικούς αισθητήρες και τηλεμετάδοση σε κεντρικά συστήματα ηλεκτρονικών υπολογιστών. Για τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα χρησιμοποιούνται: α) βροχόμετρα, β) βροχογράφοι, γ) ραντάρ, δ) δορυφόροι.

2.2 Εξωτροπικές υφέσεις

Με το χαρακτηρισμό εξωτροπική ύφεση ή αλλιώς ύφεση ή βαρομετρικό χαμηλό, ορίζεται το σύστημα το οποίο εμφανίζει μικρές τιμές ατμοσφαιρικής πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους σε σχέση με τη γύρω περιοχή. Μερικές βασικές έννοιες που αφορούν τις υφέσεις είναι το **σημείο γένεσης (κυκλογένεση)**, το **σημείο διάλυσης (κυκλοδιάλυση)**, η **τροχιά** και το **κέντρο** της ύφεσης. Ως σημείο γένεσης (source) ορίζεται το σημείο όπου πρωτοεμφανίστηκε η διαταραχή δηλαδή η ύφεση (κυκλογένεση), ενώ ως σημείο διάλυσης χαρακτηρίζεται η τελευταία εμφάνιση της ύφεσης. Η τροχιά (path) της ύφεσης υποδηλώνει την κατεύθυνση στην οποία κινείται το κέντρο της ύφεσης και αφορά τις διαδοχικές θέσεις από τις οποίες έχει περάσει το κέντρο της.

Οι εξωτροπικές υφέσεις ή αλλιώς οι υφέσεις που αναπτύσσονται σε μεσαία γεωγραφικά πλάτη, έχουν ακτίνα η οποία μπορεί να ξεπεράσει τα 500 χιλιόμετρα (Gonvushko 2012). Οι εξωτροπικές υφέσεις και των δύο ημισφαιρίων συνήθως ταξιδεύουν κυρίως από τα δυτικά στα ανατολικά με τυπικές ταχύτητες (κέντρου) στα 30-50km/h (Gonvushko 2012). Με διάρκεια από λίγες ημέρες μέχρι και πάνω από μία εβδομάδα, στους υποτροπικούς κυκλώνες του βόρειου ημισφαιρίου η κυκλοφορία του αέρα έχει φορά αντίστροφη από αυτή των δεικτών του ρολογιού, σε αντίθεση με αυτούς του νοτίου ημισφαιρίου. Κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (λόγω τριβής), ο άνεμος τέμνει τις ισοβαρείς με μικρή γωνία συγκλίνοντας προς το κέντρο το οποίο οδηγεί στη δημιουργία νεφών τα οποία συχνά καταλήγουν σε κατακρήμνιση (Jansa et al. 2000). Κατά την εξέλιξη της ύφεσης οι βαροβαθμίδες -δηλαδή η διαφορά της πίεσης σε δεδομένη απόσταση- μεγαλώνουν, διαδικασία που χαρακτηρίζεται ως βάθυνση της ύφεσης (deepening).

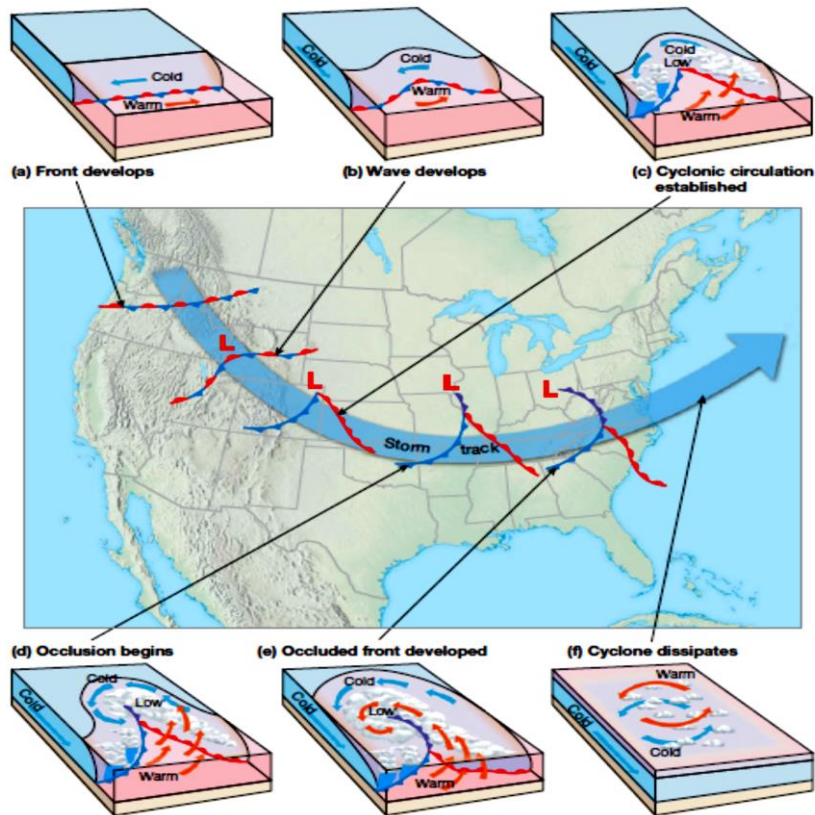
Οι εξωτροπικές υφέσεις μεγάλης δυναμικότητας πολλές φορές έχουν μεγάλο κοινωνικοοικονομικό αντίκτυπο, καθώς σχετίζονται με θυελλώδεις ανέμους και σφοδρές βροχές. Παράδειγμα αποτελεί ο Δεκέμβριος του 1999, όπου 3 ισχυρές εξωτροπικές υφέσεις (Ανατόλ, Λόθαρ και Μάρτιν) χτύπησαν την Ευρώπη προκαλώντας ζημιά του ύψους των 18 δισεκατομμυρίων ευρώ (Catto et al. 2011). Μια καταγραφή της παγκόσμιας κατανομής των υποτροπικών κυκλώνων παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2: Παγκόσμια κατανομή υποτροπικών κυκλώνων (Gonvorushko 2012).

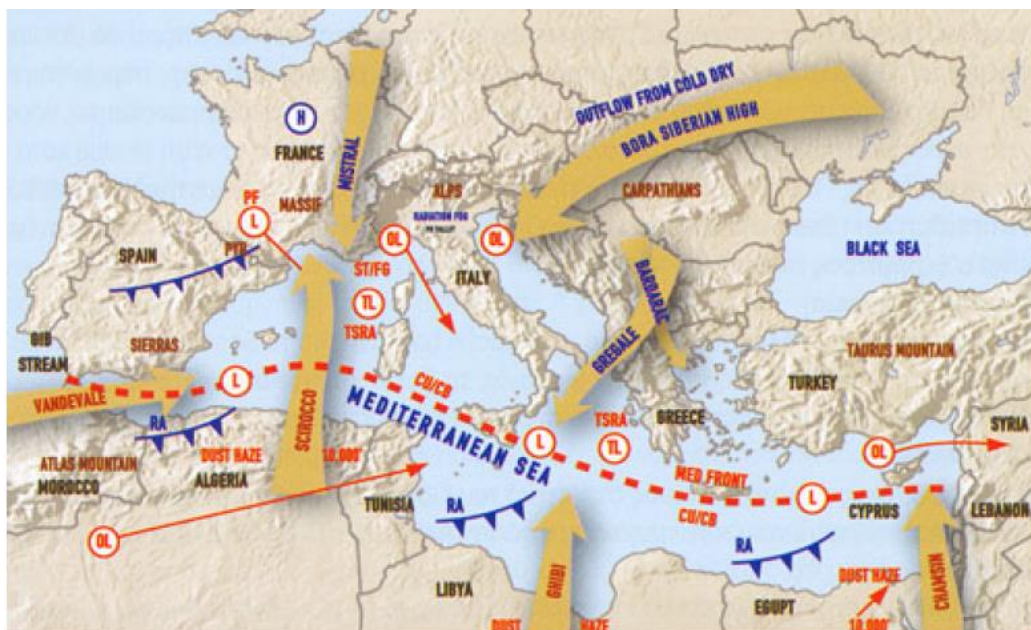
Ήδη από το 1800 οι υφέσεις ήταν γνωστές ως φορείς δυσμενών καιρικών συνθηκών. Έτσι το ‘βαρόμετρο’ εδραιώθηκε ως βασικό εργαλείο στην πρόβλεψη των αλλαγών του καιρού. Το πρόβλημα σε αυτή την πρώιμη πρόγνωση ωστόσο, ήταν η άγνοια του σημαντικού ρόλου που διαδραματίζει η αλληλεπίδραση των αερίων μαζών στο σχηματισμό αυτών των συστημάτων. Συνεπώς, δεν ήταν δυνατός ο καθορισμός των συνθηκών οι οποίες συντείνουν στη γένεση των υφέσεων μέχρι τον πρώτο παγκόσμιο πόλεμο, όπου μια ομάδα Νορβηγών επιστημόνων τεκμηρίωσαν το πρώτο μοντέλο ανάπτυξης και ενίσχυσης των υφέσεων. Το 1921 η επιστημονική αυτή έρευνα (Bjerknes and Solberg 1922) κατέληξε σε μια δημοσίευση στην οποία μοντελοποιείται ο κύκλος ζωής της ύφεσης (γέννηση, ανάπτυξη, διάλυση). Στην Εικόνα 2.3 φαίνεται ο κύκλος ζωής μιας ύφεσης σύμφωνα με το Νορβηγικό μοντέλο.

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικές έννοιες



Εικόνα 2.3: Ο κύκλος ζωής της ύφεσης σύμφωνα με το Νορβηγικό μοντέλο (Lutgens and Tarbuck 2013).

Οι πιο συνήθεις κατηγορίες υφέσεων εκτός των μετωπικών χαμηλών τα οποία περιγράφονται από το Νορβηγικό μοντέλο είναι τα θερμικά και τα ορογραφικά (ή υπήνεμα) χαμηλά. Τα βαρομετρικά συστήματα που πλήττουν τη Μεσόγειο το χειμώνα φαίνονται στην Εικόνα 2.4. Αυτά συνοψίζονται σε υφέσεις μεσογειακού μετώπου, ορογραφικές υφέσεις - όπως το χαμηλό της Γένοβας ή το χαμηλό της οροσειράς του Άτλαντα στο Μαρόκο, το υψηλό της Σιβηρίας - θερμικές υφέσεις και υφέσεις πολικού μετώπου.

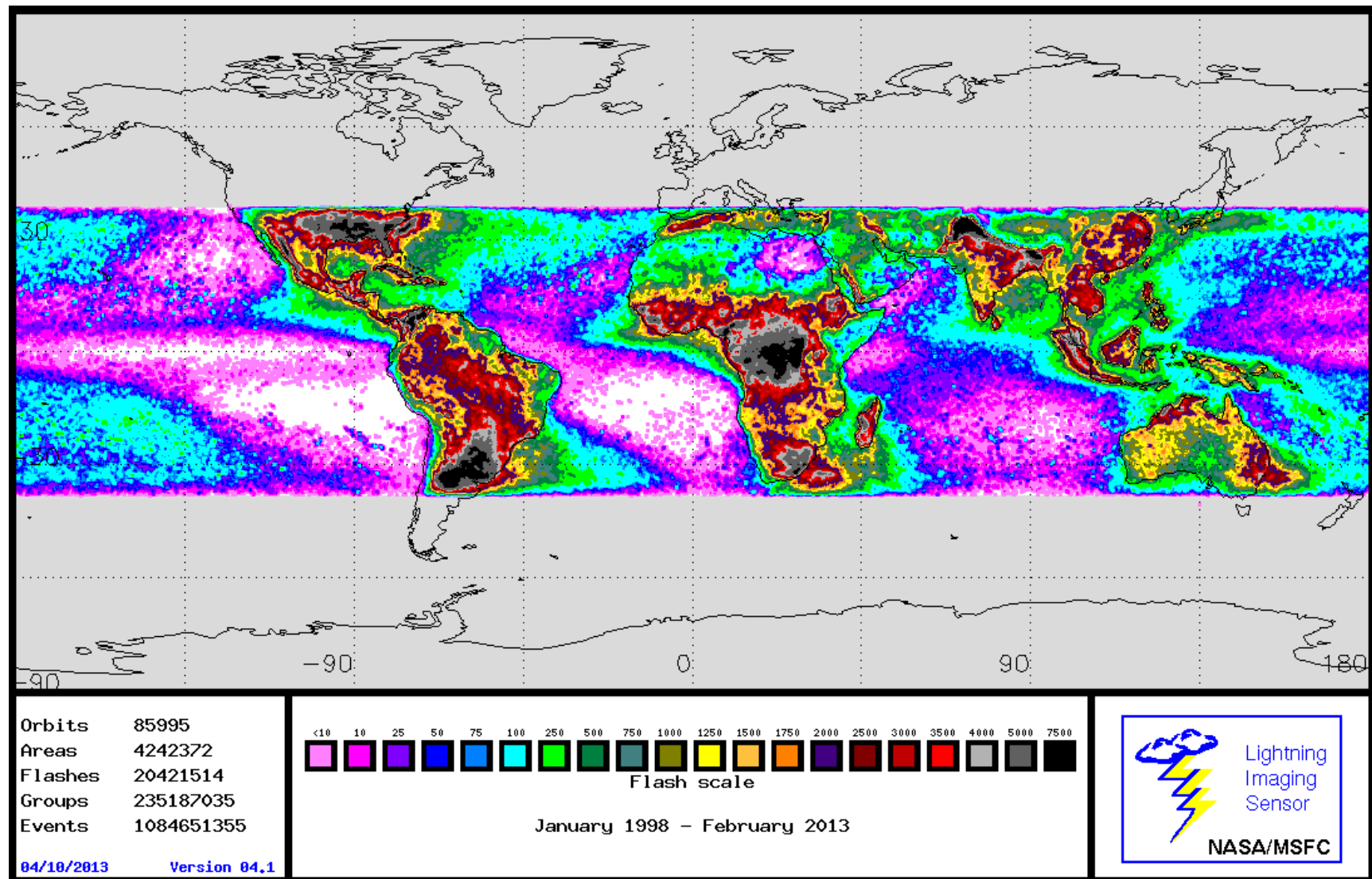


Εικόνα 2.4: Χάρτης των υφέσεων και των ανέμων που αναπτύσσονται στη Μεσόγειο το χειμώνα (Chatzialekou 2016).

2.3 Καταιγίδες-κεραυνοί

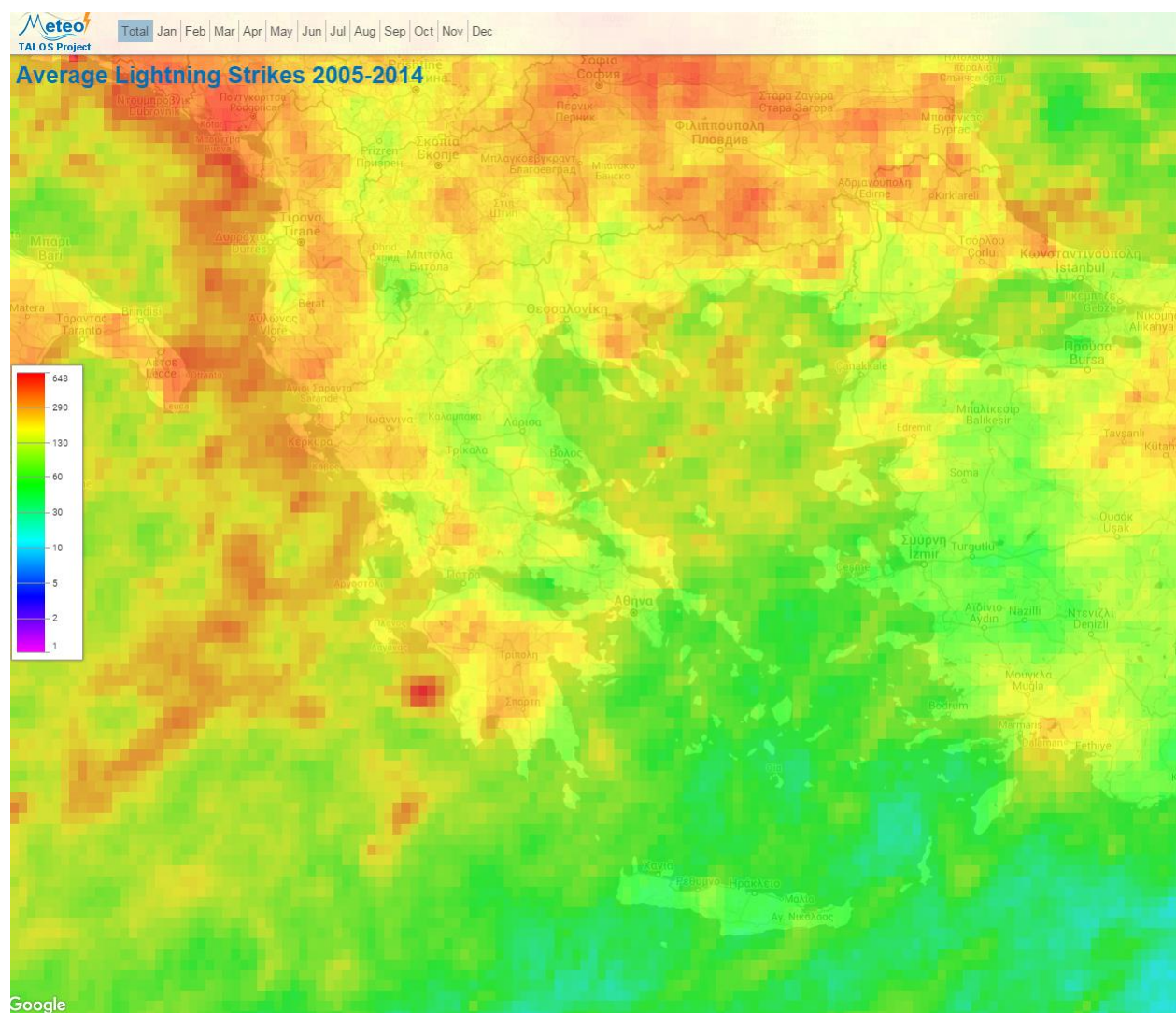
Ως κεραυνοί ορίζονται οι ηλεκτρικές εκκενώσεις της ατμόσφαιρας οι οποίες δημιουργούνται κυρίως κατά τη διάρκεια καταιγίδας και προκύπτουν μεταξύ του ίδιου ή διαφορετικών νεφών ή μεταξύ νέφους και εδάφους. Οι κεραυνοί δημιουργούνται λόγω της διαφοράς δυναμικού μέσα στα νέφη, η οποία οφείλεται στο διαχωρισμό αρνητικών-θετικών φορτίων. Κατά την εξέλιξη του νέφους και όπου αυτό φτάνει σε μεγάλα ύψη και χαμηλότερες θερμοκρασίες (μικρότερες των -20°C) οι συνθήκες γίνονται ευνοϊκές για την ανάπτυξη παγοκρυστάλλων. Εξαιτίας των συγκρούσεων μεταξύ των παγοκρυστάλλων, οι μικρότεροι αποκτούν θετικό φορτίο και οι μεγαλύτεροι αρνητικό. Λόγω της βαρύτητας, τα βαρύτερα αρνητικά φορτισμένα σωματίδια κατευθύνονται στη βάση του νέφους, ενώ αντίθετα τα μικρότερα θετικά φορτισμένα σωματίδια κατευθύνονται με τη βοήθεια των ανοδικών ρευμάτων στην κορυφή του νέφους. Η αρνητικά φορτισμένη περιοχή που δημιουργείται στη βάση του νέφους, προκαλεί τη συγκέντρωση θετικού φορτίου στο έδαφος. Σταδιακά η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο περιοχών (είτε μεταξύ των φορτισμένων περιοχών στο σύννεφο είτε μεταξύ σύννεφου-εδάφους) ξεπερνά τη διηλεκτρική αντοχή του αέρα και έχει ως αποτέλεσμα τον κεραυνό. Στις Εικόνα 2.5 και Εικόνα 2.6 φαίνεται η κατανομή των κεραυνών σε παγκόσμια κλίμακα και στην ευρύτερη περιοχή του ελλαδικού χώρου αντίστοιχα.

Οι καταιγίδες αποτελούν έντονα ατμοσφαιρικά φαινόμενα με ραγδαίες βροχοπτώσεις, ισχυρούς ανέμους οι οποίοι φτάνουν τα 50-100km/h, κεραυνούς και πολλές φορές χαλάζι. Με διάρκεια η οποία συνήθως είναι μικρότερη των δύο ωρών και μεγάλη ένταση βροχής, οι καταιγίδες πολλές φορές οδηγούν σε πλημμύρες. Οι καταιγίδες δημιουργούνται όταν θερμός και υγρός αέρας ανυψώνεται υπό ασταθείς συνθήκες της ατμόσφαιρας. Με τη λειτουργία αυτή, ευνοείται η δημιουργία ογκωδών καταιγιδοφόρων νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης (σωρειτομελανίες) τα οποία και ευθύνονται για την καταιγίδα. Τρεις είναι οι κύριες κατηγορίες καταιγίδας ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού τους: αέριας μάζας (τοπικές ή θερμικές), ορογραφικές και μετωπικές. Οι καταιγίδες αέριας μάζας δημιουργούνται κυρίως την περίοδο του καλοκαιριού πάνω από ηπειρωτικές περιοχές. Οι ορογραφικές καταιγίδες αναπτύσσονται στα δυτικά προσήνεμα των ορεινών όγκων των ηπειρωτικών περιοχών, ενώ οι μετωπικές καταιγίδες έχουν σχέση με τη διέλευση υφέσεων κυρίως κατά την περίοδο Νοεμβρίου-Μαΐου.



Εικόνα 2.5: Η παγκόσμια κατανομή κεραυνών την περίοδο 1998-2013 από τον NASA/MSFC αισθητήρα απεικόνισης κεραυνών.

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικές έννοιες



Εικόνα 2.6: Η μέση ετήσια κατανομή κεραυνών στον ευρύτερο ελλαδικό χώρο κατά την περίοδο 2005-2014 όπως έχει υπολογιστεί από το Meteo (Talos Project).

Δεν είναι οι κεραυνοί που αποτελούν το νούμερο ένα κίνδυνο για την εμφάνιση της καταιγίδας, αλλά περισσότερο άλλες παράμετροι που συνδέονται με την καταιγίδα. Ένα μεγάλο ποσοστό της τάξης του 90% των κεραυνών, αφορά κεραυνούς που συμβαίνουν μεταξύ διαφορετικών ή του ίδιου νέφους με αποτέλεσμα να μην φτάνουν ποτέ το έδαφος (Met Office 2011). Ακόμα όμως και οι κεραυνοί που τελικά φτάνουν στο έδαφος προκαλούν αμελητέα ζημιά και ακολουθούν τη μικρότερη-γρηγορότερη διαδρομή, συνήθως μέσω ψηλών αντικειμένων τα οποία βρίσκονται απομονωμένα από άλλα. Οι κυριότερες παράμετροι που συνδέονται με τις καταιγίδες και αποτελούν επικίνδυνα φαινόμενα είναι η δυνατή βροχή, το χαλάζι και οι σφοδροί άνεμοι.

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικές έννοιες

Η περιοχή με τις περισσότερες καταιγίδες είναι το νησί Ιάβα με κατά μέσο όρο 220 κεραυνούς ημερησίως. Ανά τον κόσμο σε κάθε δεδομένη στιγμή λαμβάνουν χώρα περίπου 2,000 καταιγίδες, περίπου 45,000 κάθε μέρα και πάνω από 16,000,000 ετησίως (Lutgens and Tarbuck 2013). Στις περιοχές με εύκρατο κλίμα οι καταιγίδες είναι πιο συχνές την άνοιξη και το καλοκαίρι, όμως μπορούν να προκύψουν καθ' όλη τη διάρκεια του έτους στα ψυχρά μέτωπα. Οι καταιγίδες αποτελούν σπάνιο φαινόμενο στους πόλους λόγω του ιδιαιτέρως ψυχρού κλίματος και των εν γένει σταθερών αερίων μαζών.

2.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.4.1 Υφέσεις και βροχή

Στην περιοχή της Μεσογείου τα περισσότερα γεγονότα βροχής οφείλονται σε κυκλωνική δραστηριότητα (Jansa et al. 2001a; Lionello et al. 2006). Συγκεκριμένα οι εξωτροπικές υφέσεις συνδέονται με έντονο άνεμο και βροχόπτωση αλλά και με αλλαγές στη θερμοκρασία (Ulbrich et al. 2003), συνθήκες οι οποίες ευνοούν καταστάσεις υψηλού κινδύνου όπως οι αιφνίδιες πλημμύρες αλλά και πλημμύρες ευρείας κλίμακας με σημαντικό αντίκτυπο στις σύγχρονες κοινωνίες. Συγκεκριμένα στις Μεσογειακές περιοχές τα πλημμυρικά φαινόμενα συνδέονται με τις τροχιές που ακολουθούν οι υφέσεις (Jansa et al. 2001a). Οι Μεσογειακές υφέσεις θεωρούνται υπεύθυνες για τα ακραία καιρικά φαινόμενα καθορίζοντας τόσο το χρόνο εκδήλωσής τους όσο και τις ακραίες τιμές (Lionello et al. 2006). Η αναγνώριση των κυκλωνικών κέντρων και των τροχιών τους έχουν αποτελέσει αντικείμενο πολλών ερευνητών με διαφορετικά αποτελέσματα ακόμα και για κοινές βάσεις δεδομένων (Ulbrich et al. 2009; Neu et al. 2013). Αυτοματοποιημένα συστήματα βασισμένα σε διαφορετικούς αλγόριθμους έχουν δημιουργηθεί για την αναγνώριση και ιχνηλάτηση των υφέσεων. Οι Neu et al., (2013) συνέκριναν 15 διαφορετικά συστήματα αναγνώρισης και ιχνηλάτησης υφέσεων σε κοινή βάση δεδομένων, και βρήκαν διαφορές στον αριθμό των υφέσεων, στη διάρκεια ζωής τους, τη συχνότητά τους αλλά και σε επιμέρους χαρακτηριστικές παραμέτρους τους όπως η ταχύτητα και το βάθος της ύφεσης.

Το αυτοματοποιημένο σύστημα ανίχνευσης και ιχνηλάτησης των υφέσεων το οποίο δημιουργήθηκε στο πανεπιστήμιο της Μελβούρνης, στην Αυστραλία έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε πλήθος επιστημονικών μελετών, όχι μόνο για την παραγωγή συνοπτικής και δυναμικής κλιματολογίας, αλλά και για την ανάκτηση μεμονωμένων υφέσεων και του ίχνους αυτών ακόμα και σε περιοχές με ιδιαίτερη ακτογραμμή όπως η Μεσόγειος (Leonard et al. 1999; Simmonds and Murray 1999; Flocas et al. 2010).

Σε πλήθος επιστημονικών μελετών έχουν μελετηθεί χαρακτηριστικά των Μεσογειακών υφέσεων συμπεριλαμβανομένου της κυκλογένεσης, της εποχιακής μεταβλητότητας, της χωρικής κατανομής και των δυναμικών χαρακτηριστικών τους (Trigo et al. 1999; Maheras et al. 2001; Flocas et al. 2010; Campins et al. 2011; Flaounas et al. 2014). Οι Trigo et al., (1999) με αυτοματοποιημένο σύστημα που χρησιμοποιεί το γεωδυναμικό ύψος για τη διερεύνηση των υφέσεων, μελέτησαν στη Μεσόγειο περιοχές κυκλογένεσης και κυκλόλυσης όπως επίσης και

επιμέρους χαρακτηριστικά των Μεσογειακών υφέσεων συμπεριλαμβανομένου της διάρκειας και της έντασης αυτών. Τα ευρήματά τους έδειξαν έντονη κυκλογενητική δραστηριότητα στον κόλπο της Γένοβας, νοτίως της οροσειράς του Άτλα και στην περιοχή της Μέσης Ανατολής, όπως επίσης υψηλή συχνότητα εμφάνισης χαμηλών, μάλιστα απροσδόκητα υψηλής έντασης, κατά την περίοδο της άνοιξης στη βόρεια Αφρική. Οι Campins et al., (2011) διερεύνησαν την κλιματολογία των Μεσογειακών υφέσεων για μια περίοδο 45 ετών (1957-2002) αναδεικνύοντας τις περιοχές του κόλπου της Γένοβας, την Κύπρο, περιοχές στη βόρεια Αφρική, την Ιβηρική χερσόνησο, τη θάλασσα του Αιγαίου και της Αλγερίας ως σημαντικές περιοχές κυκλογένεσης με σημαντικές εποχιακές διαφοροποιήσεις. Οι Flocas et al., (2010) πραγματοποίησαν αξιολόγηση των υφέσεων στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου, για μια περίοδο 40 χρόνων (1962-2001). Σε αυτή την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό του πανεπιστημίου της Μελβούρνης και διαπιστώθηκαν σημαντικές διαφορές στην πυκνότητα των υφέσεων για τους διαφορετικούς μήνες. Ακόμα οι Maheras et al., (2001) και οι Bartholy et al., (2008) αναγνώρισαν και ανέλυσαν υφέσεις συνοπτικής κλίμακας στην περιοχή της Μεσογείου για τις περιόδους 1958-1997 και 1957-2002 αντίστοιχα, δίνοντας έμφαση στη συχνότητα εμφάνισης, τον τόπο εμφάνισης, την κυκλογένεση και τις εποχικές διαφοροποιήσεις. Τέλος, οι Rudeva and Gulev, (2007) μελετώντας τις υφέσεις του βόρειου ημισφαιρίου της περιόδου 1984-2004, διαπίστωσαν ότι το μέγεθος της ύφεσης είναι μια σημαντική παράμετρος η οποία έχει επίδραση στη διάρκεια ζωής και την ένταση της ύφεσης. Η συσχέτιση των υφέσεων με τη βροχή έχει επίσης γίνει αντικείμενο πληθώρας μελετητών. Πολλοί συμφωνούν ότι τα χαρακτηριστικά των υφέσεων και η συχνότητα εμφάνισής τους επηρεάζουν την εκδήλωση βροχόπτωσης. Σύμφωνα με τους Flaounas et al., (2014) οι οποίοι εξέτασαν πάνω από 200 συστήματα υφέσεων μεγάλης έντασης σε μια εικοσαετή περίοδο, η ισχυρότερη βροχόπτωση εντοπίστηκε κοντά στο κέντρο της ύφεσης, υποδεικνύοντας σχετική αδυναμία των Μεσογειακών υφέσεων συγκριτικά με αυτές που αναπτύσσονται στους ωκεανούς. Οι Jansa et al. (2001a) βρήκαν ότι ισχυρές βροχοπτώσεις (μεγαλύτερες των 60 χιλιοστών ημερησίως) σε διαφορετικά σημεία στην περιοχή της Μεσογείου, συνδέονται με την παρουσία ύφεσης στη γύρω περιοχή. Οι Hawcroft et al., (2012) διερεύνησαν κατά πόσο οι εξωτροπικές υφέσεις των μεσαίων γεωγραφικών πλατών συνεισφέρουν στη βροχή του βορείου ημισφαιρίου και βρήκαν συσχέτιση που ξεπερνά το 70%. Επίσης οι Catto et al., (2012) ποσοτικοποίησαν τη συσχέτιση της βροχής με διαφορετικές κατηγορίες μετώπων και βρήκαν ότι μέχρι και το 90% της βροχόπτωσης οφείλεται σε ψυχρά και θερμά μέτωπα. Σύμφωνα με τους Miglietta et al., (2013) το

χρονικό σημείο που συμβαίνουν οι πιο έντονες βροχοπτώσεις είναι πριν τη φάση ωρίμανσης της ύφεσης.

2.4.2 Κεραυνοί και βροχή

Η συσχέτιση της κεραυνικής δραστηριότητας με ισχυρές βροχοπτώσεις έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών ερευνητών (Pineda et al. 2007; Mazarakis et al. 2008; Michaelides et al. 2010; Koutroulis et al. 2012; Siingh et al. 2013; Petrova et al. 2014). Η έρευνα των φυσικών φαινομένων που σχετίζονται με τη βροχόπτωση έχει μεγάλη σημασία καθώς οι ακραίες βροχοπτώσεις αποτελούν υψηλού κινδύνου φυσικές καταστροφές, με αρνητικές επιπτώσεις στην εξέλιξη των σύγχρονων κοινωνιών (Reale and Lionello 2013). Εκτός αυτού, η καλύτερη κατανόηση της σχέσης μεταξύ της κεραυνικής δραστηριότητας και της βροχόπτωσης θα μπορούσε να βελτιώσει την ολιστική αντίληψη των γεγονότων καταιγίδας ή ακόμη και την βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη ακραίων καταιγίδων (Petrova et al. 2014; Siingh et al. 2014). Μεγάλη έμφαση έχει δοθεί από την επιστημονική κοινότητα στην κεραυνική δραστηριότητα, γεγονός το οποίο οφείλεται εν μέρει στο ότι πολλά σύγχρονα τεχνολογικά συστήματα τα οποία αποτελούν στάθμη-της-τεχνικής μπορούν με μεγάλη ακρίβεια και σχετικά εύκολα να καταγράψουν την κεραυνική δραστηριότητα.

Διαφορετικές στρατηγικές έχουν ακολουθηθεί για την διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της κεραυνικής δραστηριότητας και των βροχοπτώσεων, κυρίως ψάχνοντας την ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ του αριθμού των κεραυνών και της συσσώρευσης της βροχής. Ανάλογα με τη μεθοδολογία, τον τύπο των δεδομένων και τη γεωγραφική θέση της περιοχής μελέτης (θαλάσσια, παράκτια ή ηπειρωτική) τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν σημαντικά. Οι συσχετίσεις μεταξύ του αριθμού των κεραυνών και της ποσότητας βροχής έχουν μεγάλη απόκλιση σε διαφορετικές μελέτες δίνοντας από υψηλή μέχρι πολύ χαμηλή συσχέτιση (Katsanos et al. 2007; Michaelides et al. 2009; Koutroulis et al. 2012).

Η μελέτη των Katsanos et al. (2007), στην περιοχή της Κεντρικής και Ανατολικής Μεσογείου για περίοδο ανάλυσης 6 μηνών (από τον Οκτώβριο 2003 έως το Μάρτιο του 2004) δείχνει ότι υψηλές τιμές βροχόπτωσης συμπίπτουν με την εμφάνιση κεραυνών. Συγκεκριμένα, οι περιπτώσεις βροχής υψηλότερης του 1mm βρέθηκαν να σχετίζονται με κεραυνούς σε ποσοστό που ξεπερνά το 50% και μόνο το 6% των εκδηλώσεων βροχής με βροχή υψηλότερη από 10 mm να σχετίζονται με κεραυνούς. Στη μελέτη των Koutroulis et al., (2012) διερευνήθηκε η σχέση μεταξύ των γεγονότων υψηλής βροχόπτωσης (τα οποία οφείλονται σε αιφνίδιες βροχές) και των κεραυνών, με περιοχή

μελέτης την Κρήτη, για τη χρονική περίοδο 2008-2009. Υπολογίστηκε η γραμμική συσχέτιση της αθροιστικής βροχόπτωσης και του αριθμού των κεραυνών για διαφορετικές χρονικές υστερήσεις και ακτίνες εντοπισμού δίνοντας μέση συσχέτιση 0.33. Η ακτίνα εντοπισμού που βρέθηκε να δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα στη συσχέτιση βροχής-κεραυνών είναι στα 15 km γύρω από το σταθμό και η βέλτιστη χρονική υστέρηση επιτυγχάνεται όταν η άθροιση των κεραυνών γίνεται 15 λεπτά πριν από την αντίστοιχη άθροιση της βροχής. Οι Soula and Chauzy (2001) μελέτησαν δύο γεγονότα κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου στην περιοχή του Παρισιού και βρήκαν καλή χωρική συσχέτιση μεταξύ βροχής-κεραυνών για διαφορετικές αναλύσεις πλέγματος η οποία φτάνει το 0.9 για χωρική ανάλυση 30 km. Η ανάλυση των 30 km βρέθηκε επίσης να δίνει καλά αποτελέσματα στη χωρική συσχέτιση. Οι Michaelides et al. (2009) εφάρμοσαν μια τεχνική πλέγματος στους βροχομετρικούς σταθμούς για το νησί της Κύπρου, χωρίζοντας την περιοχή ενδιαφέροντος σε 12 πλεγματικές υποπεριοχές και συσχετίζοντας την ποσότητα της βροχής με τον αριθμό των κεραυνών για διαφορετικά σενάρια βροχής και κεραυνών. Η ανίχνευση της κεραυνικής δραστηριότητας εφαρμόστηκε σε ακτίνα 10-15 km γύρω από τους βροχόμετρικούς σταθμούς και διαφορετικές χρονικές υστερήσεις για βροχή υψηλότερη των 5mm, δίνοντας συσχετίσεις μεταξύ 0.8-1 για ορισμένες περιπτώσεις. Για τις τρεις περιπτώσεις πλημμυρικών επεισοδίων που αναλύθηκαν στην παρούσα μελέτη, τα αποτελέσματα συσχέτισης βροχής-κεραυνών δεν ήταν αρκούντως ικανοποιητικά. Η συνέχεια της ανάλυσης των Michaelides et al., (2010) αναφορικά με τη συσχέτιση βροχής-κεραυνών για δεκαεννέα γεγονότα βροχής στην Κύπρο, με τη χρήση μίας χωροχρονικής στατιστικής μεθόδου έδωσε βελτιωμένα αποτελέσματα συσχέτισης. Με τη χρήση των δεδομένων Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) για διάφορα μέρη της Ινδίας, για τη χρονική περίοδο 2003-2011, οι Siingh et al., (2014) διαπιστώσαν κατά μέσο όρο θετική συσχέτιση μεταξύ κεραυνών και βροχής η οποία φθάνει το 0.53. Επίσης, για το χρονικό διάστημα από 1998-2010 οι Siingh et al., (2013) βρήκαν υψηλή συσχέτιση (0.68 έως 0.81) μεταξύ κεραυνών και βροχής πάνω στην περιοχή της νότιου-νοτιοανατολικής Ασίας. Οι Barnolas et al., (2008), μελέτησαν μια περίπτωση πλημμύρας στην περιοχή της Καταλονίας και διαπίστωσαν ότι μέσα σε μια ακτίνα 6 χιλιομέτρων η συσχέτιση μεταξύ βροχής-κεραυνών αυξάνεται όταν αυξάνεται ο αριθμός των κεραυνών στην ακτίνα εντοπισμού (περισσότεροι από 100 κεραυνοί σε 30 λεπτά).

Η μέθοδος της ομαδοποίησης έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στους κεραυνούς, τόσο για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη τους, όσο και για τη σύνδεση τους με τη βροχή. Οι Strauss et al., 2013

πραγματοποιήσαν χωροχρονική ομαδοποίηση βασισμένη στη χρονική ολίσθηση (για διάφορα χρονικά παράθυρα) και στη συνέχεια υπολόγισαν την πυκνότητα του πυρήνα (kernel density), χρησιμοποιώντας τον Εκτιμητή Παροχής Ατμοσφαιρικής Πυκνότητας (Atmospheric Discharge Density Estimator), το οποίο στα Πορτογαλικά αντιστοιχεί στο ακρωνύμιο EDDA. Στη συνέχεια εκτιμήθηκε η συσχέτιση μεταξύ των ενεργών κελιών κεραυνών και των δομών της βροχής όπως αυτές προσδιορίζονται από τις εικόνες του ραντάρ καιρού, και έχοντας υποστεί κατάτμηση για διαφορετικές τιμές της χωρικής και χρονικής μετατόπισης δίνοντας αποτελέσματα από 0.1 έως 0.8 για δύο περιπτώσεις πλημμυρικών επεισοδίων στο Σάο Πάολο, Βραζιλία. Στη μελέτη των Kohn et al., (2011), με χρήση του Ολοκληρωμένου Συστήματος Προειδοποίησης και Υποστήριξης Αποφάσεων (Warning Decision Support System–Integrated Information, WDSS-II), το οποίο αποτελεί εργαλείο απεικόνισης των κεραυνών και παρέχει την παρακολούθηση και πρόβλεψη της εξέλιξης των ηλεκτρικά ενεργών κελιών με ιεραρχική ομαδοποίηση k-means, αξιολογήθηκε η δραστηριότητα των κεραυνών με στόχο τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της πορείας της καταιγίδας. Η πιθανότητα εντοπισμού αγγίζει το 0.519 και 0.389 για ακτίνα εντοπισμού 5 km και για προβάδισμα χρόνου 30 και 20 λεπτά αντίστοιχα. Οι Pineda and Montanya, (2009) χρησιμοποίησαν ιεραρχική ομαδοποίηση στην Καταλονία, προκειμένου να αναγνωρίσουν περιοχές με κοινούς μηχανισμούς που προκαλούν τις βροχοπτώσεις.

Ενώ υπάρχουν σημαντικές ενδείξεις από προηγούμενες μελέτες ότι οι κεραυνοί μπορεί να αποτελέσουν ένα σημαντικό εργαλείο για την αξιολόγηση της καταιγίδας ή ακόμη και της βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης των δυνητικά καταστροφικών καταιγίδων, οι διαφορές στα αποτελέσματα των διαφόρων μελετών δείχνουν ισχυρή εξάρτηση της συσχέτισης με τη μεθοδολογία, τον τύπο των δεδομένων, τη γεωγραφική θέση της περιοχής μελέτης (θαλάσσια, παράκτια ή η ηπειρωτική) και άλλους κλιματολογικούς παράγοντες.

3 Μέθοδοι

3.1 Υφέσεις και βροχή

3.1.1 Αλγόριθμος ανίχνευσης υφέσεων

Οι υφέσεις ανιχνεύονται χρησιμοποιώντας το λογισμικό του Πανεπιστημίου της Μελβούρνης (MS scheme), το οποίο ακολουθεί τη θεωρία κατά Lagrange (Murray and Simmonds 1991; Lim and Simmonds 2007). Το MS scheme λειτουργεί με είσοδο πεδία πίεσης στην επιφάνεια της θάλασσας (MSLP) προβλεβημένα σε πλέγμα πολικών στερεογραφικών συντεταγμένων με χρήση της μεθόδου παρεμβολής bicubic spline. Η αναγνώριση των πιθανών περιοχών αναζήτησης επιτυγχάνεται με την αναγνώριση των κλειστών συστημάτων μέγιστου στροβιλισμού που ταυτόχρονα συνδυάζονται με τοπικά ελάχιστα πίεσης. Η στρατηγική αυτή δίνει το πλεονέκτημα της εξεύρεσης τόσο ανοιχτών όσο και κλειστών κυκλωνικών συστημάτων, πράγμα το οποίο έχει πολύ μεγάλη σημασία, διότι οι υφέσεις εξελίσσονται και κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους μπορούν να αλλάξουν κατάσταση.

Οι δυναμικές και θερμοδυναμικές παράμετροι, όπως η ακτίνα της ύφεσης, το βάθος και η έντασή της υπολογίζονται από το MS Scheme από τους μαθηματικούς τύπους που ακολουθούν:

Η ακτίνα της ύφεσης υπολογίζεται στην εξίσωση (3.1):

$$R^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i^2 \quad (3.1)$$

Όπου r_i είναι η απόσταση από το κέντρο της ύφεσης μέχρι τα σημεία όπου η Λαπλασιανή της πίεσης μηδενίζεται, και N είναι ο αριθμός των ακτινών που υπάρχουν με αζιμούθια γωνία μεταξύ τους 20° (Lim and Simmonds 2007).

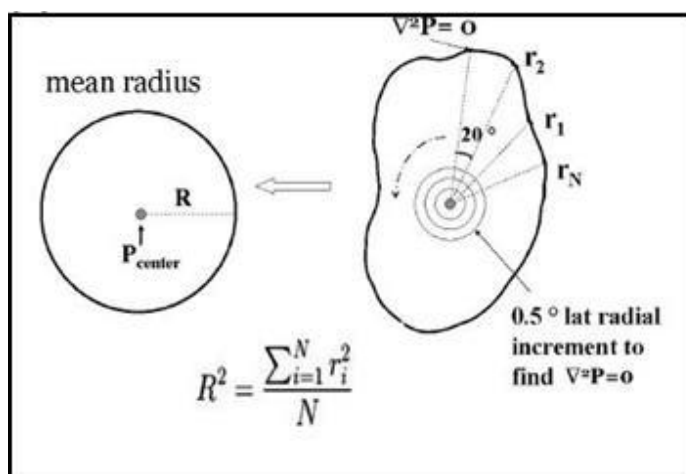
Ως αντιπροσωπευτική μέθοδος για τη μέτρηση της έντασης της ύφεσης χρησιμοποιείται η Λαπλασιανή της πίεσης $\nabla^2 P$ (Murray and Simmonds 1991; Simmonds and Keay 2000; Lim and Simmonds 2007).

Το βάθος της ύφεσης υπολογίζεται στην εξίσωση (3.2):

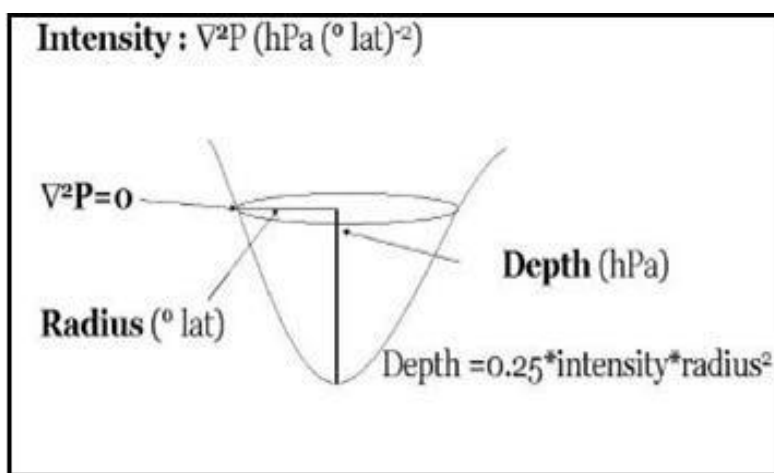
$$D = \frac{1}{4} R^2 \nabla^2 P \quad (3.2)$$

Όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.2), το βάθος της ύφεσης εξαρτάται από το μέγεθος της ύφεσης και την ένταση (Λαπλασιανή της πίεσης). Το βάθος της ύφεσης υποδεικνύει τη διαφορά πίεσης μεταξύ της άκρης της ύφεσης και του κέντρου της.

Αναλυτικότερη περιγραφή του αλγορίθμου MS scheme δίδεται από τους (Murray and Simmonds 1991; Simmonds and Keay 2000; Lim and Simmonds 2007).



Εικόνα 3.1: Υπολογισμός της ακτίνας της ύφεσης (Lim and Simmonds 2007).



Εικόνα 3.2: Υπολογισμός του βάθους της ύφεσης (Lim and Simmonds 2007).

3.1.2 Σύνδεση βροχής-υφέσεων

Για τη σύνδεση των γεγονότων βροχής με τις υφέσεις αξιοποιήθηκε η χωροχρονική πληροφορία των δύο φαινομένων. Υιοθετήθηκαν δύο όροι με του οποίους εφεξής θα αναφέρονται οι υφέσεις

ανάλογα με τη χρονική εξέλιξή τους στο πεδίο μελέτης. Ως επιδρώντες θα αναφέρονται οι υφέσεις που από τη στιγμή που παρατηρούνται, παρατηρείται αντίστοιχα κάποιο γεγονός βροχής σε κάποιον σταθμό στην περιοχή μελέτης. Λόγω της χρονικής αυτής σύμπτωσης και θέσης, θεωρείται ότι οι επιδρούσες υφέσεις είναι υπεύθυνες για το γεγονός αυτό. Αναλυτικότερη περιγραφή των χωροχρονικών κριτηρίων θα γίνει παρακάτω. Ο δεύτερος ορισμός αφορά τις υφέσεις οι οποίες στη διάρκεια της πορείας τους θα αποτελέσουν επιδρούσα ύφεση όπως αυτή ορίστηκε νωρίτερα. Οι υφέσεις αυτές θα αναφέρονται ως ενεργές υφέσεις. Συνεπώς, μια ύφεση που αναφέρεται ως ενεργή σε κάποιο επόμενο βήμα της πορείας της θα γίνει επιδρούσα. Χρονικά, τα χαρακτηριστικά της ύφεσης (όπως για παράδειγμα το κέντρο της) εκτιμώνται κάθε 6 ώρες ενώ η πληροφορία για τη βροχή είναι ημερήσια. Συνεπώς, οι υφέσεις που συναντώνται μεταξύ 2 διαδοχικών εγγραφών βροχής είναι αυτές που δυνητικά προκαλούν το δεύτερο γεγονός της βροχής. Σύμφωνα με το 50°, 95° και 99.5° εκατοστημόριο ημερήσιας συσσώρευσης βροχής, τα γεγονότα βροχής χωρίζονται σε 3 κατηγορίες:

- Μέση βροχόπτωση: 50° -95° εκατοστημόριο ημερήσιας βροχής.
- Έντονη βροχόπτωση: 95° -99.5° εκατοστημόριο ημερήσιας βροχής.
- Σφοδρή βροχόπτωση: >99.5° εκατοστημόριο ημερήσιας βροχής.

Τα εκατοστημόρια της βροχής έχουν υπολογιστεί αφού έχουν προηγουμένως αποκλειστεί οι ξηρές ημέρες, δηλαδή οι ημέρες στις οποίες έχει καταγραφεί βροχή μικρότερη του 1 χιλιοστού ημερησίως. Θεωρούμε ότι έχουμε ένα γεγονός βροχής όταν τουλάχιστον ένας εκ των εν χρήσει μετεωρολογικών σταθμών έχει καταγράψει βροχή μέσα στα χωροχρονικά όρια μελέτης.

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση των γεγονότων βροχής με τις υφέσεις είναι η θέση του κέντρου της ύφεσης σε σχέση με την περιοχή μελέτης. Η απόσταση μεταξύ του κέντρου της ύφεσης και της περιοχής μελέτης πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση με την ακτίνα της ύφεσης, έτσι ώστε η ύφεση να ‘τέμνει’ την περιοχή μελέτης. Υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ του κέντρου της ύφεσης και των συνόρων της περιοχής ενδιαφέροντος και συγκρίνεται με την ακτίνα της ύφεσης. Εάν η απόσταση αυτή είναι μικρότερη της ακτίνας, η ύφεση θεωρείται υπεύθυνη (επιδρούσα ύφεση) για το καταγεγραμμένο γεγονός βροχής. Δεν θεωρήθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν πιο περίπλοκα μέτρα απόστασης ή να γίνει μέτρηση της απόστασης κατευθείαν από το βροχομετρικό σταθμό, καθώς ο αλγόριθμος που βρίσκει το κέντρο και την ακτίνα της ύφεσης μπορεί να περιέχει σφάλμα και απόκλιση στην εκτίμηση που κάνει και συνεπώς να οδηγήσει σε απώλεια πληροφορίας. Επίσης η παραδοχή ότι η ύφεση είναι κύκλος ουσιαστικά

δεν αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα, καθώς η μορφολογία των υφέσεων στο χώρο είναι σαφώς πιο περίπλοκη.

Ένα ορθογώνιο σύνορο έχει θεωρηθεί γύρω από την περιοχή μελέτης, το οποίο εσωκλείει την περιοχή ενδιαφέροντος. Επίσης, έχουν θεωρηθεί τομείς γύρω από την περιοχή μελέτης: οι W, NW, SW, S, SE, E, NE και N ανάλογα με τον προσανατολισμό τους στην περιοχή μελέτης.

3.1.3 Χωρικοί χάρτες πιθανοτήτων

Προκειμένου να υπολογιστεί η πιθανότητα να προκληθεί επεισόδιο βροχής στην περιοχή μελέτης από μια ύφεση που έχει εντοπιστεί στην ευρύτερη περιοχή, χρησιμοποιείται πλέγμα καθορισμένης ανάλυσης. Οι υφέσεις που διέρχονται από την περιοχή εκχωρούνται στο πλέγμα ανάλογα με την τοποθεσία του κέντρου τους. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές για τα γεωγραφικά μήκη και πλάτη του κέντρου των υφέσεων συγκρίνονται με τα σύνορα του πλέγματος και τοποθετούνται ανάλογα στην κατάλληλη θέση. Οι πιθανότητες υπολογίζονται ως ο λόγος του αριθμού των ενεργών υφέσεων προς τον συνολικό αριθμό διερχόμενων υφέσεων για κάθε κελί του πλέγματος και για κάθε κατηγορία βροχής από αυτές που παρουσιάστηκαν προηγουμένως:

$$\text{Pr}_{c,rc} = \frac{AC_{c,rc}}{TC_{c,rc}} \quad (3.3)$$

Όπου $\text{Pr}_{c,rc}$ είναι η πιθανότητα μιας ύφεσης που περνά από το κελί c να προκαλεί στην περιοχή ενδιαφέροντος βροχή της κατηγορίας rc . Η παράμετρος AC αντιστοιχεί στον αριθμό των ενεργών υφέσεων και το TC στο συνολικό αριθμό των υφέσεων. Και οι δύο αυτοί παράμετροι υπολογίζονται για κάθε κελί και κατηγορία βροχής.

Ένα δεύτερο μέτρο πιθανότητας που εφαρμόζεται, είναι αυτό της κανονικοποιημένης πιθανότητας με βάρη (WNP-Weighted-Normalized Probability), η οποία υπολογίζεται όπως η απλή πιθανότητα που περιεγράφηκε παραπάνω, $\text{Pr}_{c,rc}$, πολλαπλασιασμένη με μια μεταβλητή, που στην περίπτωση μας, είναι ο αριθμός των ενεργών υφέσεων. Έπειτα, το αποτέλεσμα κανονικοποιείται μεταξύ 0-1 στο σύνολο των κελιών του πλέγματος για κάθε κατηγορία βροχής:

$$\text{WNP}_{c,rc} = \text{Pr}_{c,rc} * \frac{AC_{c,rc}}{\max_c(\text{Pr}_{c,rc} * AC_{c,rc})} \quad (3.4)$$

Ακόμα, υπολογίζονται οι πιθανοτικοί πίνακες για τις υφέσεις με ακραία χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά των υφέσεων που αφορούν στο βάθος της ύφεσης, την ένταση και την ακτίνα επιλέγονται ώστε να έχουν τιμή μεγαλύτερη της αντίστοιχης μέσης τιμής συν δύο φορές τη διακύμανση. Αυτό αντιστοιχεί στο 2.3% των δεδομένων λαμβάνοντας υπόψιν την κανονική κατανομή και ακόμα λιγότερα όταν η κατανομή είναι αριστερά ασύμμετρη. Σε αυτή την περίπτωση οι παραπάνω τύποι εξακολουθούν να ισχύουν, αλλάζει μόνο ο πληθυσμός των υφέσεων.

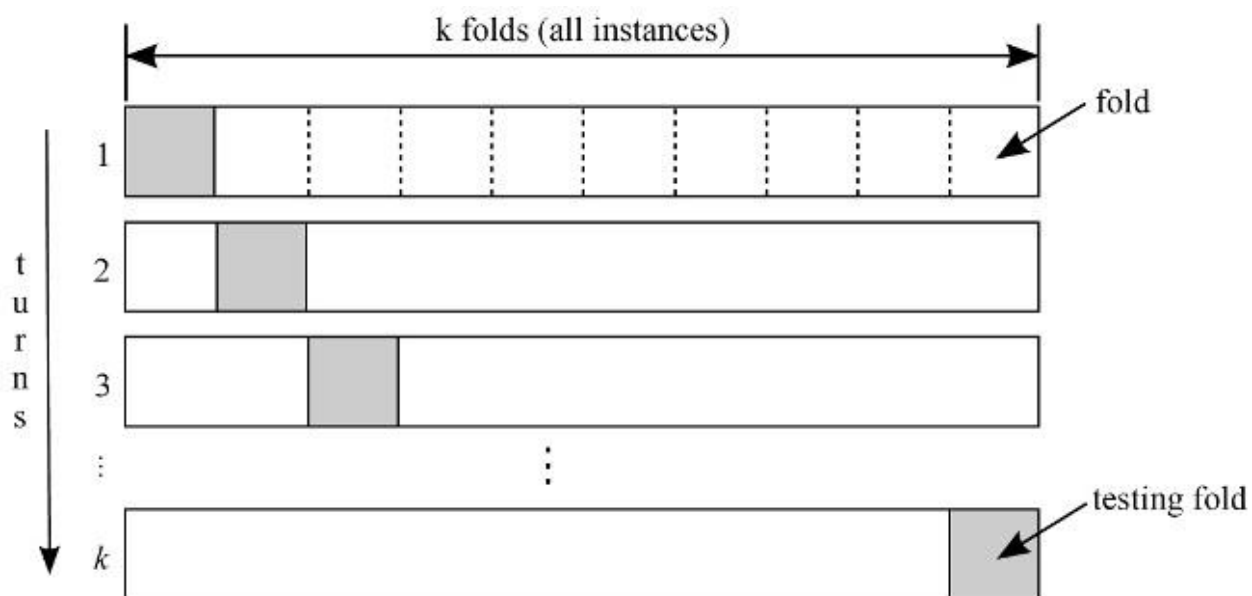
3.1.4 Προγνωστική αξιολόγηση

Οι χωρικοί πίνακες πιθανοτήτων αξιολογούνται με τα στατιστικά μέτρα της ευαισθησίας (sensitivity), της ειδικότητας (specificity) και της ακρίβειας (accuracy) με τα οποία γίνεται αξιολόγησή τους στο κατά πόσο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόγνωση της βροχόπτωσης. Η μέθοδος της διασταυρωμένης επικύρωσης σε 10 μέρη (10-fold cross validation) σε συνδυασμό με την προσομοίωση Monte Carlo για 100 επαναλήψεις έδωσαν 1000 διαφορετικά σύνολα δοκιμής και εξέτασης προς αξιολόγηση.

Πιο συγκεκριμένα, με τη μέθοδο της διασταυρωμένης επικύρωσης σε 10 μέρη το σύνολο δεδομένων οργανώνεται με τυχαίο τρόπο σε 10 διαφορετικές ομάδες οι οποίες αποτελούνται από υφέσεις σε ολοκληρωμένες τροχιές. Τα 10 σύνολα κυκλωνικών τροχιών ανταποκρίνονται σε 10 πειράματα σε καθένα από τα οποία το ένα σύνολο χρησιμοποιείται για την επικύρωση του μοντέλου και τα άλλα 9 για την εκπαίδευσή του, δηλαδή για τη δημιουργία του χάρτη πιθανοτήτων. Ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου διασταυρωμένης επικύρωσης σε k μέρη φαίνεται και στην Εικόνα 3.3. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται 100 φορές (μέθοδος Monte Carlo). Η μέθοδος Monte Carlo κρίνεται σκόπιμο να εφαρμοστεί, έτσι ώστε να έχουμε περισσότερα σύνολα δεδομένων πάνω στα οποία θα εκτιμηθούν τα στατιστικά μέτρα που εξετάζουμε. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούν να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα αφού ο όγκος των αποτελεσμάτων θα είναι μεγαλύτερος.

Το κριτήριο για να θεωρηθεί μία ύφεση ενεργή εξαρτάται από το κατώφλι της πιθανότητας. Αν το κέντρο της ύφεσης βρίσκεται σε κάποιο κελί του πλέγματος για το οποίο η υπολογισμένη πιθανότητα από τον πίνακα πιθανοτήτων είναι μεγαλύτερη από το καθορισμένο κατώφλι, τότε η ύφεση μπορεί να θεωρηθεί ως ενεργή, δυνητικά δηλαδή σε κάποιο επόμενο βήμα της πορείας της θα προκαλέσει γεγονός βροχής στην περιοχή ενδιαφέροντος. Το κατώφλι της πιθανότητας

υπολογίζεται με τρόπο τέτοιοιον ώστε να βελτιστοποιεί τις τιμές των στατιστικών μέτρων της ευαισθησίας, της ειδικότητας και της ακρίβειας. Στην περίπτωση που παραπάνω από ένας πίνακας πιθανοτήτων συμμετέχει στην απόφαση για το χαρακτηρισμό της ύφεσης ως ενεργή, τότε αν τουλάχιστον ένας από αυτούς τους πίνακες έχει θετική ψήφο, δηλαδή η τιμή του είναι μεγαλύτερη από το κατώφλι που έχει οριστεί, η ύφεση θεωρείται ενεργή. Με άλλα λόγια οι επιμέρους πίνακες πιθανοτήτων δίνουν θετική ψήφο. Πέντε διαφορετικές περιπτώσεις πινάκων πιθανοτήτων εξετάζονται και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.



Εικόνα 3.3: Ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου διασταυρωμένης επικύρωσης σε k μέρη (k-fold cross validation) (Borovicka et al. 2012).

Πίνακας 3.1: Οι πίνακες πιθανοτήτων για το χαρακτηρισμό των υφέσεων.

‘NoCri’:	Ο απλός πίνακας πιθανοτήτων (no extra criteria).
‘3Cri’:	Ο απλός πίνακας πιθανοτήτων σε συνεργασία με πίνακες πιθανοτήτων ακραίων υφέσεων ως προς τα χαρακτηριστικά του βάθους, της ακτίνας και της έντασης τους (criteria on cyclone selection).
‘WN’:	WNP πίνακες πιθανοτήτων.
‘WN3Cri’:	WNP πίνακες πιθανοτήτων σε συνεργασία με WNP πίνακες πιθανοτήτων ακραίων υφέσεων ως προς τα χαρακτηριστικά του βάθους, της ακτίνας και της έντασης τους.
‘NoCri+WN’:	Ο απλός πίνακας πιθανοτήτων σε συνεργασία με τον WNP πίνακα πιθανοτήτων.

Όταν μία ύφεση σε κάποιο σημείο της τροχιάς της χαρακτηριστεί σύμφωνα με τους πίνακες πιθανοτήτων ως ενεργή, αυτό σημαίνει ότι θεωρούμε ότι δυνητικά σε κάποιο σημείο της τροχιάς της στο απώτερο μέλλον θα γίνει επιδρούσα προκαλώντας γεγονός βροχής στην Κρήτη. Αναφορικά με το εάν αυτή η απόφαση είναι τελικά σωστή ή λανθασμένη, υπολογίζονται τα στατιστικά μέτρα της ευαισθησίας, της ειδικότητας και της ακρίβειας (Mcbride and Ebert 2000; Vich et al. 2011). Ακολουθεί ο ορισμός των στατιστικών μέτρων της ευαισθησίας, της ειδικότητας και της ακρίβειας. Το μέτρο της ευαισθησίας υπολογίζεται στην εξίσωση (3.5):

$$S = \frac{TP}{P} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3.5)$$

Όπου η ευαισθησία S είναι ο λόγος μεταξύ των αληθινά θετικών τιμών TP (True Positives) προς όλες τις θετικές τιμές σωστά TP ή όχι FN (False Negatives) αναγνωρισμένες ως θετικές. Η ευαισθησία αναδεικνύει την ικανότητα του πίνακα πιθανοτήτων να εντοπίζει τις ενεργές υφέσεις. Όσο υψηλότερες τιμές έχει η ευαισθησία, τόσο περισσότερες ενεργές υφέσεις εντοπίζει το μοντέλο και άρα πετυχαίνει υψηλότερη πρόβλεψη της επικείμενης βροχόπτωσης.

Το μέτρο της ειδικότητας υπολογίζεται στην εξίσωση (3.6):

$$SP = \frac{TN}{N} = \frac{TN}{TN + FP} \quad (3.6)$$

Όπου η ειδικότητα SP είναι ο λόγος μεταξύ των πραγματικά αρνητικών TN (True Negatives) προς όλες τις αρνητικές τιμές σωστά TN ή όχι FP (False Positives) αναγνωρισμένες ως αρνητικές. Η ειδικότητα αναδεικνύει την ικανότητα του πίνακα πιθανοτήτων να απορρίπτει ορθώς την υπόθεση

ότι μία ύφεση είναι ενεργή. Όσο υψηλότερες τιμές έχει η ειδικότητα, τόσο περισσότερες μη ενεργές υφέσεις εντοπίζει το μοντέλο και άρα πετυχαίνει την ορθή απόρριψη της πρόβλεψης επικείμενης βροχόπτωσης και άρα λάθος συναγερμού (wrong alarm).

Το μέτρο της ακρίβειας υπολογίζεται στην εξίσωση (3.7):

$$AC = \frac{TP + TN}{P + N} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (3.7)$$

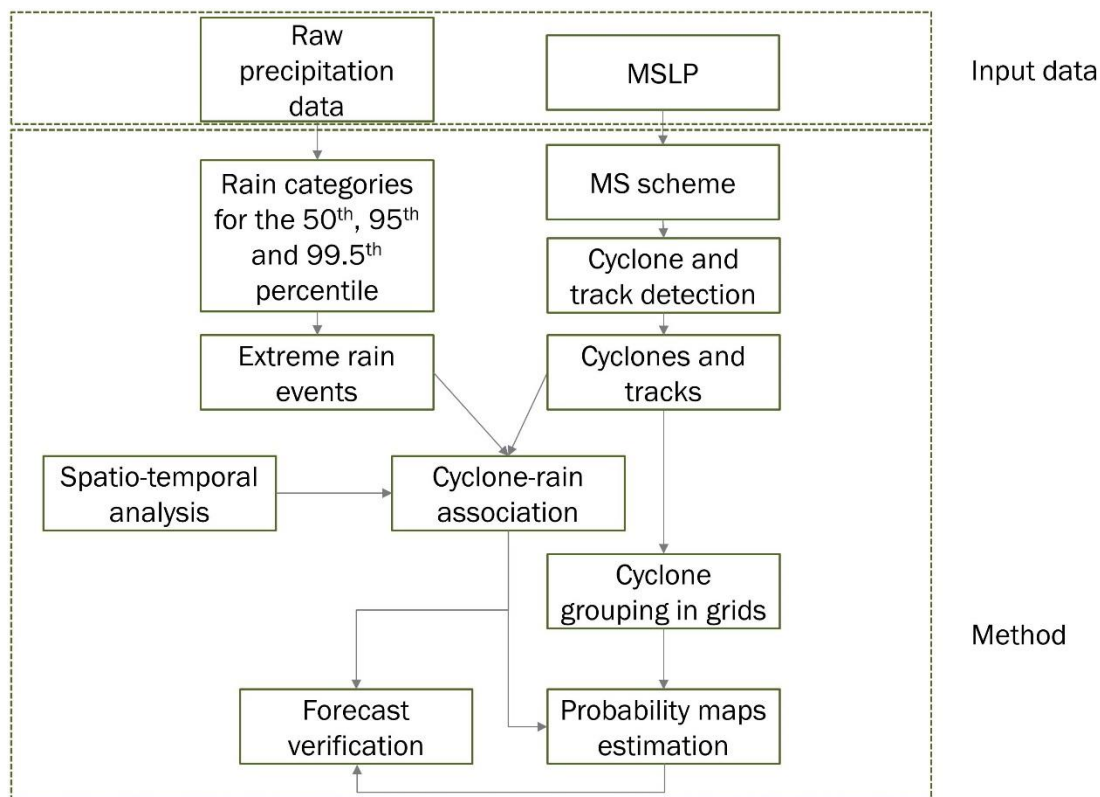
Όπου ακρίβεια AC είναι ο λόγος μεταξύ των πραγματικά αρνητικών TN και θετικών TP προς όλες τις αρνητικές και θετικές τιμές σωστά ή όχι αναγνωρισμένες, δηλαδή προς το σύνολο των υφέσεων. Στον Πίνακα 3.2 συνοψίζονται οι όροι από τους οποίους υπολογίζονται τα στατιστικά μέτρα της ευαισθησίας, της ειδικότητας και της ακρίβειας.

Πίνακας 3.2: Εξήγηση των όρων από τους οποίους υπολογίζονται τα στατιστικά μέτρα της ευαισθησίας, της ειδικότητας και της ακρίβειας.

True Positive (TP):	Η ύφεση προκαλεί βροχή και το τεστ είναι θετικό.
False Positive (FP):	Η ύφεση δεν προκαλεί βροχή και το τεστ είναι θετικό.
True Negative (TN):	Η ύφεση δεν προκαλεί βροχή και το τεστ είναι αρνητικό.
False Negative (FN):	Η ύφεση προκαλεί βροχή και το τεστ είναι αρνητικό.
Positive (P):	Άθροισμα των TP και FN.
Negative (N):	Άθροισμα των TN και FP.

3.1.5 Πιθανοτικό μοντέλο βροχής

Τα στοιχεία τα οποία αναλύθηκαν παραπάνω αξιολογήθηκαν για τη δημιουργία ενός μοντέλου το οποίο εκμεταλλευόμενο την πληροφορία που δίνουν οι υφέσεις θα μπορεί να δίνει προειδοποίηση για ενδεχόμενα γεγονότα βροχής. Μια συνοπτική παρουσίαση αυτού του μοντέλου φαίνεται στην Εικόνα 3.4. Σύμφωνα με το διάγραμμα, αρχικά δίνονται ως δεδομένα εισόδου η μέση ατμοσφαιρική πίεση (MSLP) και η βροχή. Τα δεδομένα των πιέσεων δίνονται ως είσοδος στο λογισμικό MS scheme από το οποίο προκύπτουν οι υφέσεις, οι τροχιές τους και επιμέρους χαρακτηριστικά τους. Τα δεδομένα της βροχής αξιολογούνται και χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με την έντασή τους. Έπειτα γίνεται η συσχέτιση βροχής-υφέσεων. Το πεδίο μελέτης χωρίζεται σε κελιά και για κάθε κελί υπολογίζεται η πιθανότητα να αποτελέσουν ενεργές υφέσεις σε κάποιο μελλοντικό χρονικό βήμα οι διερχόμενες υφέσεις. Με τη σύνθεση των κελιών που αποτελούν το πεδίο μελέτης, προκύπτουν οι χάρτες πιθανοτήτων. Τέλος, γίνεται η προγνωστική αξιολόγηση των χαρτών.



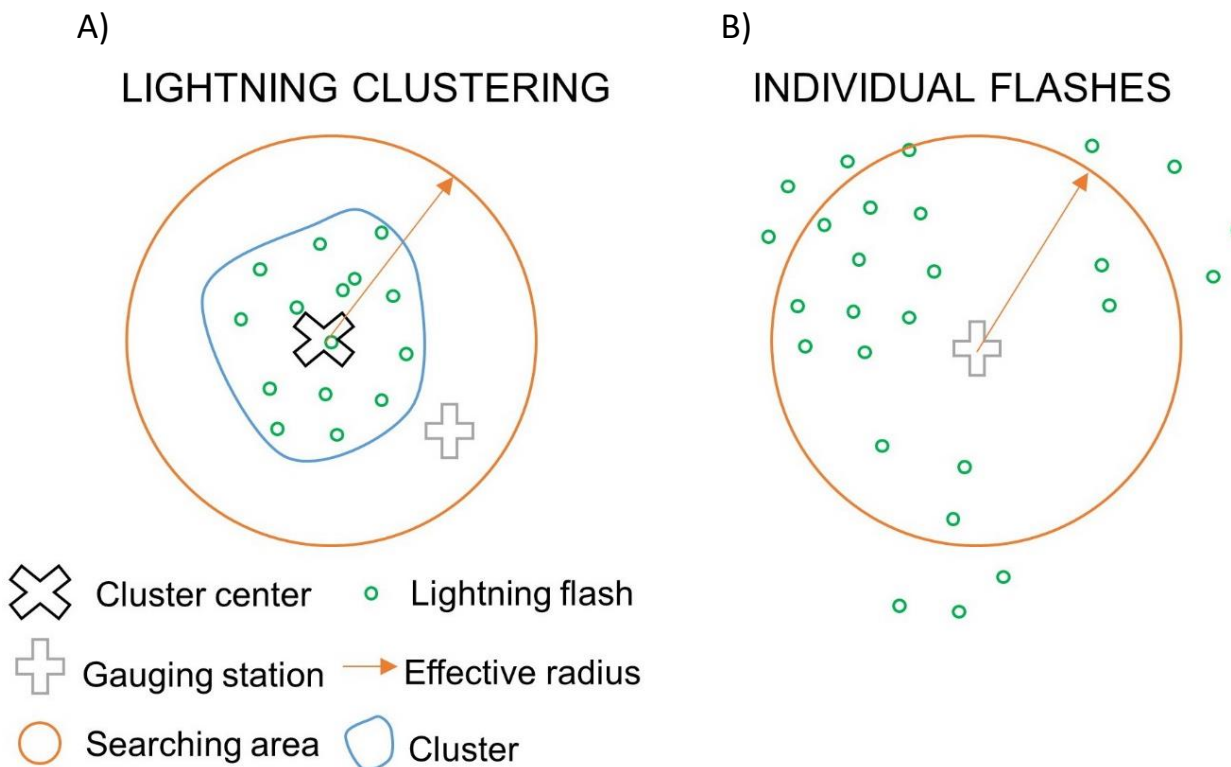
Εικόνα 3.4: Συνοπτική απεικόνιση του μοντέλου πρόβλεψης της βροχής.

3.2 Κεραυνοί και βροχή

3.2.1 Περιοχή αναζήτησης

Για τη διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ των κεραυνών και της βροχής χρησιμοποιούνται δύο προσεγγίσεις οι οποίες παρουσιάζονται γραφικά στην Εικόνα 3.5. Στην πρώτη προσέγγιση χρησιμοποιείται ως κέντρο της περιοχής αναζήτησης το κέντρο της συστάδας κεραυνών όπως αυτό έχει προκύψει από την ομαδοποίηση των κεραυνών με χρήση αλγορίθμων ομαδοποίησης (G-means και k-means). Σε αυτή την περίπτωση υπολογίζεται το κέντρο της συστάδας κεραυνών και σε μια περιοχή γύρω από αυτό για μεταβλητή ακτίνα διερευνάται κατά πόσο υπάρχουν βροχομετρικοί σταθμοί με καταγεγραμμένη βροχή (Εικόνα 3.5 στήλη Α). Στη δεύτερη προσέγγιση ως κέντρο της περιοχής αναζήτησης θεωρούνται οι βροχομετρικοί σταθμοί με καταγεγραμμένη βροχόπτωση. Για μεταβλητή ακτίνα σαρώνεται η περιοχή γύρω από το σταθμό για τον εντοπισμό τυχόν κεραυνών (Εικόνα 3.5 στήλη Β). Σε αυτή την περίπτωση υπολογίζεται η συσχέτιση μεταξύ του αριθμού των κεραυνών με την ποσότητα της βροχής.

Ο κύκλος με το πορτοκαλί χρώμα ορίζει την περιοχή αναζήτησης και το αντιστοίχου χρώματος βέλος την ακτίνα εντοπισμού. Στο αριστερό γράφημα η περιοχή αναζήτησης σκανάρεται για την εύρεση βροχομετρικών σταθμών εντός αυτής με κέντρο το κέντρο της συστάδας των κεραυνών ενώ στο δεξί η περιοχή αναζήτησης σκανάρεται για την εύρεση κεραυνών. Οι κεραυνοί συμβολίζονται με πράσινους μικρούς κύκλους, οι βροχομετρικοί σταθμοί με γκρι σταυρό, με μαύρο x το κέντρο της συστάδας κεραυνών και με μπλε περίγραμμα ορίζεται η περιοχή που εσωκλείει τη συστάδα κεραυνών.



Εικόνα 3.5: Γραφική απεικόνιση των δύο διαφορετικών προσεγγίσεων για τη συσχέτιση βροχής-κεραυνών. Αριστερά σαρώνεται η περιοχή γύρω από τη συστάδα κεραυνών για εύρεση βροχομετρικών σταθμών. Δεξιά σαρώνεται η περιοχή γύρω από το βροχομετρικό σταθμό για ανεύρεση κεραυνών.

3.2.2 Μέθοδοι ομαδοποίησης

Προκειμένου να συγκεντρωθούν στο χώρο και το χρόνο τα σημεία που αφορούν στους κεραυνούς χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος ομαδοποίησης των k-means (MacQueen 1967). Ο k-means είναι ένας απλός, αποδοτικός και ευρέως χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών σε διάφορους τομείς (Jain et al. 1999; Wagstaff et al. 2001; Jain 2010) κάτι το οποίο τον καθιστά ιδανικό εργαλείο για την ομαδοποίηση των κεραυνών στο χωροχρόνο.

Ο k-means ξεκινά με k τυχαία αρχικά σημεία τα οποία θέτει ως κέντρα των ομάδων και στα οποία εκχωρούνται τα σημεία που βρίσκονται πιο κοντά ώστε να μειωθεί το τετραγωνικό σφάλμα. Τα κέντρα των ομάδων ενημερώνονται έτσι ώστε να αποτελούν τον μέσο όρο των σημείων τα οποία αποτελούν τις ομάδες. Πιο συγκεκριμένα, έστω $X = \{X_i\}, i = 1, \dots, n$ ο i -διάστατος χώρος των σημείων προς ομαδοποίηση και $C = \{C_j\}, j = 1, \dots, J$ το σύνολο των J ομάδων. Τα σημεία οργανώνονται στις αντίστοιχες ομάδες έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το άθροισμα των

τετραγώνων μέσα στις ομάδες. Τα καινούρια κέντρα $M = \{\mu_j\}, j = 1, \dots, J$ υπολογίζονται από τα στοιχεία των ομάδων και έπειτα τα σημεία από όλες τις ομάδες αναδιατάσσονται ώστε να καταταχθούν στην πλησιέστερη ομάδα. Το άθροισμα των τετραγώνων εντός της ομάδας ορίζεται ως:

$$WCSS_{C_j} = \sum_{x_i \in C_j} \|x_i - \mu_j\|^2 \quad (3.8)$$

Στόχος του k-means είναι η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του WCSS πάνω σε όλες τις ομάδες:

$$\underset{C}{\operatorname{argmin}} \sum_{j=1}^J WCSS_{C_j}$$

Ο k-means είναι ένα άπληστο NP-δυσκολίας πρόβλημα το οποίο μπορεί να υποβαθμιστεί σε απλούστερο και άρα να βρεθεί λύση μόνο εάν ο αριθμός των ομάδων είναι γνωστός (Jain 2010).

Ο αριθμός των ομάδων αποφασίζεται από έναν άλλο αλγόριθμο, τον επονομαζόμενο G-means (Hamerly and Elkan 2003). Ο G-means χωρίζει τα δεδομένα σε ομάδες με τη βοήθεια του k-means, μέχρι τα δεδομένα που έχουν εκχωρηθεί σε κάθε ομάδα να ακολουθούν γκαουσιανή κατανομή. Πιο συγκεκριμένα, αν τα δεδομένα σε μια ομάδα είναι Gaussian, τότε η ομάδα δεν χωρίζεται περαιτέρω, σε διαφορετική περίπτωση η ομάδα διαιρείται στα δύο με χρήση k-means ($k = 2$).

Στη διατριβή αυτή, κάθε φορά που εφαρμόζεται ο k-means η τυχαία αρχικοποίηση των κέντρων εκτελείται 10 φορές, προκειμένου να επιτευχθεί μικρότερο τετραγωνικό σφάλμα. Το τεστ καλής εφαρμογής chi-square (Snedecor, George W., Cochran 1989) εκτελείται στα σημεία κάθε ομάδας ώστε να διαπιστωθεί εάν ακολουθούν γκαουσιανή κατανομή. Το chi-square τεστ δίνει μια τυχαία μεταβλητή (X^2) η οποία ορίζεται ως:

$$X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i} \quad (3.9)$$

Όπου o_i, e_i είναι η παρατηρούμενη και αναμενόμενη συχνότητα του χωρίου i θεωρώντας ότι τα δεδομένα έχουν χωριστεί σε k χωρία. Το επίπεδο σημαντικότητας έχει επιλεγεί έπειτα από δοκιμές στο $\alpha=0.0001$. Ο έλεγχος καλής προσαρμογής δε διενεργείται στα αυτούσια τριών διαστάσεων δεδομένα αλλά στην προβολή αυτών σε μία διάσταση. Έστω $v = c_1 - c_2$ το τρισδιάστατο διάνυσμα που ενώνει τα κέντρα δύο ομάδων. Λόγω του γεγονότος ότι το διάνυσμα v θεωρείται σημαντικό στον k-means, τα δεδομένα προβάλλονται εκεί:

$$x'_i = \langle x_i, v \rangle / \|v\|^2 \quad \forall x \in c_1, c_2 \quad (3.10)$$

Συνοπτικά τα βήματα του αλγορίθμου **G-means** είναι τα εξής:

- 1^ο Βήμα: Διχοτόμηση του συνόλου των δεδομένων με χρήση του αλγορίθμου k-means για $k=2$.
- 2^ο Βήμα: Προβολή των δεδομένων των δύο υποσυνόλων στο μονοδιάστατο χώρο.
- 3^ο Βήμα: Εφαρμογή σε κάθε υποσύνολο Gaussian τεστ για να διαπιστωθεί εάν τα δεδομένα ακολουθούν γκαουσιανή κατανομή (στο μονοδιάστατο χώρο).
- 4^ο Βήμα: Επανάληψη της διαδικασίας από το 1^ο βήμα για όποιο υποσύνολο δεν έχει δεδομένα που ακολουθούν γκαουσιανή κατανομή.

Σκοπός του αλγορίθμου είναι η κατάληξη στις τελικές ομάδες με κάθε υποσύνολο να ακολουθεί γκαουσιανή κατανομή (στο μονοδιάστατο χώρο). Περισσότερες λεπτομέρειες για τον τρόπο λειτουργίας του G-means μπορούν να βρεθούν στο Hamerly and Elkan (2003).

3.2.3 Μέθοδος χωροχρονικής ομαδοποίησης κεραυνών

Οι κεραυνοί οργανώνονται σε ομάδες-συστάδες ανάλογα με τη χωροχρονική τους ταυτότητα, δηλαδή την τοποθεσία τους (γεωγραφικό μήκος και πλάτος) και τη χρονική τους σφραγίδα. Για να επιτευχθεί η οργάνωση των κεραυνών σε ομάδες με φυσική σημασία χρησιμοποιείται μια μέθοδος ομαδοποίησης. Η ομαδοποίηση βασίζεται στη λογική του ότι τα δεδομένα αναγνωρίζονται και οργανώνονται σε ομάδες βάση των ομοιοτήτων τους. Έτσι, ανάλογα με το χώρο ιδιοτήτων των δεδομένων, οι αλγόριθμοι ομαδοποίησης βρίσκουν περιοχές που μπορούν να διαχωριστούν από τις άλλες λόγω των ανομοιοτήτων τους, ώστε να αποτελέσουν μια ξεχωριστή ομάδα. Στη δική μας περίπτωση, η χρονική τους σφραγίδα και οι συντεταγμένες των κεραυνών χρησιμοποιούνται ως χαρακτηριστικά για την ταυτοποίηση των περιοχών με έντονη κεραυνική δραστηριότητα.

Στη συνέχεια, γίνεται θεώρηση μιας ακτίνας εντοπισμού από το κέντρο κάθε ομάδας και η κυκλική περιοχή που ορίζεται από αυτή την ακτίνα ερευνάται για βροχομετρικούς σταθμούς. Η συγκεκριμένη διαδικασία επαναλαμβάνεται για διαφορετικές ακτίνες εντοπισμού. Η χρονική διάρκεια της συστάδας κεραυνών ορίζεται από τους κεραυνούς μέλη της ομάδας-συστάδας που έχουν την αντίστοιχη μεγαλύτερη και μικρότερη χρονική σφραγίδα, t_1 - t_2 . Οι συστάδες κεραυνών για τις οποίες θα υπάρχει τουλάχιστον ένας βροχομετρικός σταθμός με καταγεγραμμένη βροχή

στην περιοχή αναζήτησης θα αναφέρονται εφεξής ως ενεργές ομάδες. Η πιθανότητα σύμπτωσης κεραυνών και βροχής υπολογίζεται ανάλογα με το εάν υπάρχει τουλάχιστον ένας βροχομετρικός σταθμός με καταγεγραμμένη βροχόπτωση στην περιοχή αναζήτησης κατά τη χρονική περίοδο που διαρκεί η συστάδα των κεραυνών. Η πιθανότητα ορίζεται ως:

$$P_{i,r} = \frac{NEC}{NC} \quad (3.11)$$

Όπου i είναι η κατηγορία της βροχής ανάλογα με την έντασή της, r είναι η ακτίνα εντοπισμού, NEC είναι ο αριθμός των ενεργών ομάδων κεραυνών, και NC είναι το σύνολο των συστάδων κεραυνών στην περιοχή αναζήτησης στην οποία περιέχονται βροχομετρικοί σταθμοί (ασχέτως αν στους βροχομετρικούς σταθμούς έχει καταγραφεί βροχή ή όχι). Η παραπάνω πιθανότητα χρησιμοποιείται ως μέτρο συσχέτισης μεταξύ των κεραυνών και της βροχής. Η δυναμική αυτής της προσέγγισης είναι να διερευνηθεί κατά πόσο οργανωμένες ομάδες κεραυνών στο χώρο και στο χρόνο, είναι δυνατόν δυνητικά να αποτελέσουν ένδειξη μιας καταιγίδας ικανής να επηρεάσει την ευρύτερη περιοχή.

3.2.4 Συσχέτιση ποσότητας βροχής-αριθμού κεραυνών

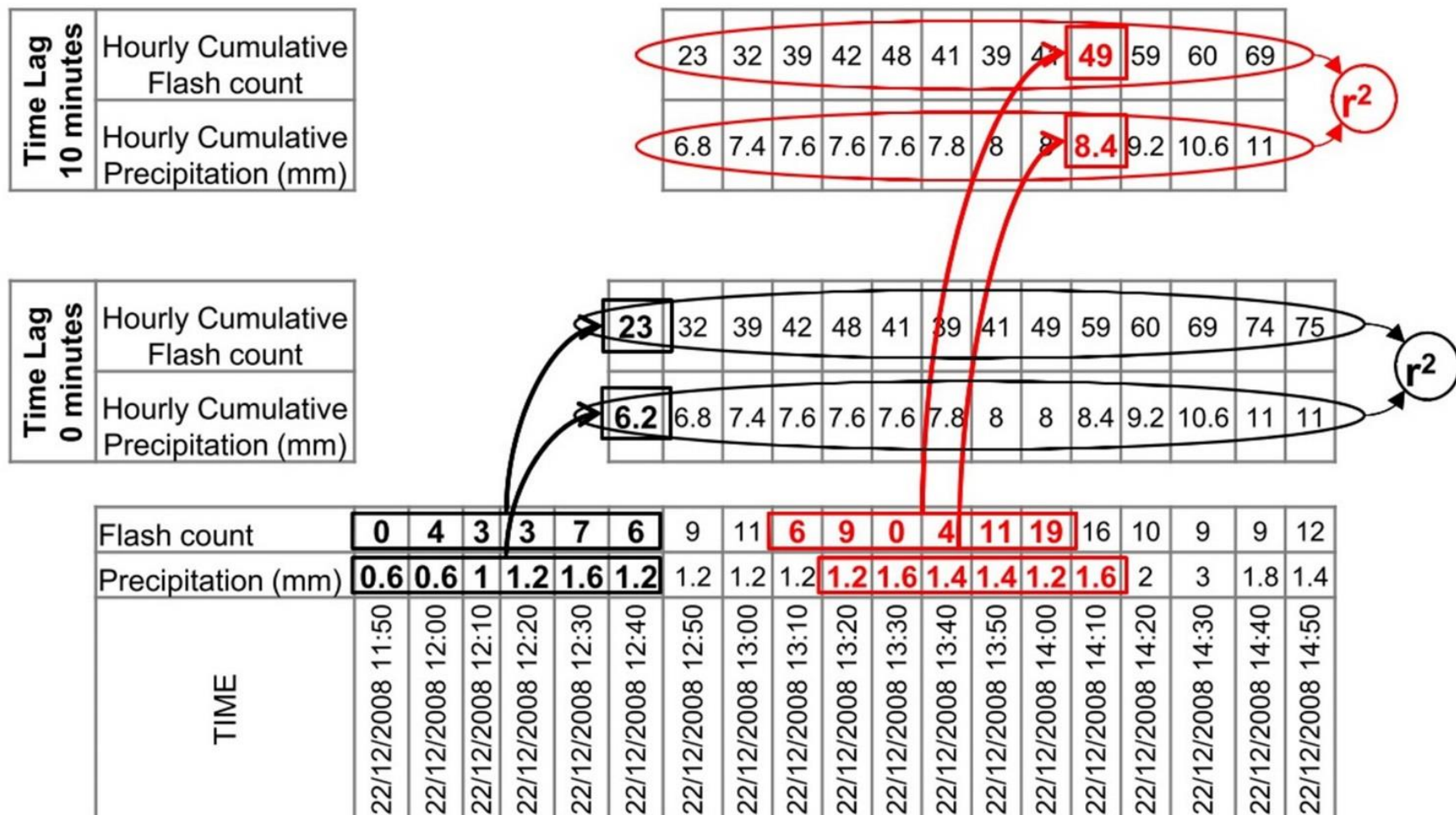
Σε αυτή την περίπτωση οι κεραυνοί αντιμετωπίζονται μεμονωμένα. Μια ακτίνα εντοπισμού θεωρείται από το κέντρο κάθε βροχομετρικού σταθμού, μέσα στην οποία διερευνάται η ύπαρξη κεραυνών. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για διαφορετικές ακτίνες εντοπισμού. Η συσχέτιση υπολογίζεται μεταξύ του αριθμού των κεραυνών και της ποσότητας βροχής για τα μη-μηδενικά ζευγη με τη χρήση του τετραγωνικού συντελεστή προσδιορισμού κατά Pearson (r^2). Όπως αναφέρεται και στη μελέτη των Koutroulis et al. (2012) οι πολύ χαμηλές έως και μηδενικές τιμές βροχόπτωσης δίνουν αυξημένες τιμές συσχέτισης που όμως δεν ανταποκρίνονται στην πραγματική εικόνα, φαινόμενο το οποίο αποφεύγεται όταν απαλειφτούν τέτοιες περιπτώσεις. Επίσης, αποκλείοντας τις μηδενικές τιμές διαπιστώνεται εάν σε μια καταιγίδα υπάρχει συσχέτιση του αριθμού των κεραυνών με την ποσότητα της βροχής. Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι ένα στατιστικό μέτρο το οποίο αναδεικνύει τη σχέση μεταξύ μεταβλητών και κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1. Όταν υπάρχει ισχυρή σχέση μεταξύ των μεταβλητών ο δείκτης συσχέτισης έχει υψηλές τιμές κοντά στο 1 με το 1 να υποδεικνύει την πλήρη συσχέτιση. Αντίθετα όταν δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών, τότε ο δείκτης λαμβάνει χαμηλές τιμές. Για τον χαρακτηρισμό του

συντελεστή προσδιορισμού θα χρησιμοποιηθούν οι κατηγορίες του Πίνακα 3.3 κατά Dancy and Reidy (2004):

Πίνακας 3.3: Χαρακτηρισμός της συσχέτισης ανάλογα με την τιμή του συντελεστή προσδιορισμού.

Συντελεστής προσδιορισμού (R^2)	Χαρακτηρισμός συσχέτισης
1	Τέλεια
0.7 - 0.9	Δυνατή
0.4 - 0.6	Μέτρια
0.1 - 0.3	Αδύναμη
0	Μηδενική

Ο αριθμός των κεραυνών και οι χρονοσειρές της συσσώρευσης της βροχής για όλη την περίοδο ανάλυσης αλλά και για επιλεγμένα γεγονότα χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό του συντελεστή προσδιορισμού, για διάφορες χρονικές υστερήσεις και χρονικά παράθυρα. Χρονική υστέρηση ορίζεται η χρονική μετατόπιση μιας χρονοσειράς σε σχέση με μια άλλη χρονοσειρά. Είναι σημαντική η εξέταση της χρονικής υστέρησης καθώς η απόκριση της μιας χρονοσειράς σε σχέση με την άλλη μπορεί να έχει καθυστέρηση. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, η χρονοσειρά της βροχής μετατοπίζεται χρονικά 0, 10, 20, 30, 40, 50 και 60 λεπτά ώστε να έπεται της κεραυνικής δραστηριότητας, αφού είναι γνωστό ότι οι κεραυνοί προηγούνται της βροχής (Soula et al. 1998; Strauss et al. 2013). Αφού γίνει η χρονική μετατόπιση των χρονοσειρών, επιλέγονται τα μη μηδενικά ζεύγη των χρονοσειρών και με αυτά υπολογίζεται η ο συντελεστής προσδιορισμού. Η αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται για τις χρονοσειρές αυτές αθροισμένες για διαφορετικά χρονικά παράθυρα, από 10 λεπτά της ώρας μέχρι και 60 λεπτά με χρονικό βήμα 10 λεπτών. Ένα παράδειγμα του υπολογισμού του συντελεστή προσδιορισμού πάνω στις χρονοσειρές των κεραυνών και της βροχής φαίνεται στην Εικόνα 3.6. Ο υπολογισμός γίνεται και για διάφορα σενάρια που αφορούν το πλήθος των κεραυνών (δηλαδή για πάνω από 0, 5 και 10 κεραυνούς) κάτι το οποίο κρίνεται σημαντικό (Michaelides et al., 2009) καθώς μικρός αριθμός κεραυνών δύναται να οδηγήσει σε παραπλανητικά και μεροληπτικά αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα που αφορούν στη συσχέτιση γίνονται αποδεκτά εφόσον ικανοποιείται το 90% επίπεδο εμπιστοσύνης στη συσχέτιση.



Εικόνα 3.6: Παράδειγμα που αφορά στον υπολογισμό του συντελεστή προσδιορισμού (Koutroulis et al. 2012).

4 Δεδομένα και περιοχή μελέτης

4.1 Δεδομένα

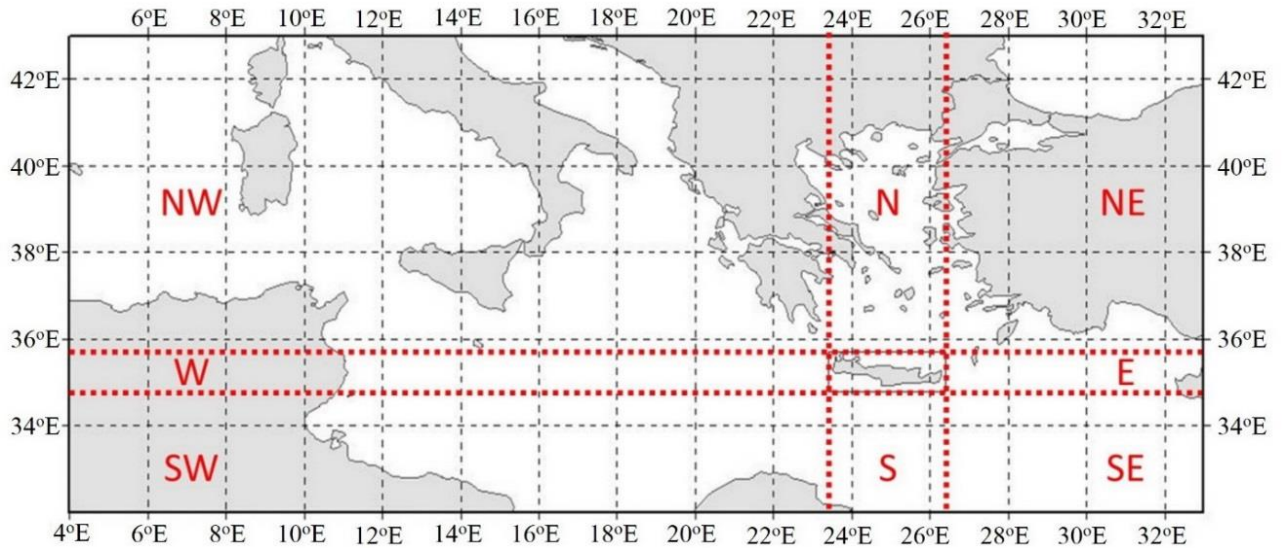
4.1.1 Υφέσεις και βροχή

Στη διδακτορική αυτή διατριβή, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα μέσης ατμοσφαιρικής πίεσης στη στάθμη της θάλασσας (MSLP) από το Ευρωπαϊκό Μετεωρολογικό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων (ECMWF) ERA-Interim για την περίοδο μεταξύ του 1979 και του 2011 στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου μεταξύ 4° - 33° Ανατολικά και 32° - 43° Βόρεια όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1.

Τα δεδομένα ERA-Interim είναι πλεγματικά δεδομένα 6-ωρης χρονικής ανάλυσης με χρονική βάση 0000, 0600, 1200, και 1800 UTC και με χωρική ανάλυση 0.5°x0.5° (Courtier et al. 1998). Η βάση δεδομένων ERA-INTERIM είναι η πιο πρόσφατη παγκόσμια βάση δεδομένων του ECMWF. Η χρονική κάλυψη των δεδομένων της εκτείνεται από το 1979-2016 ενώ παρουσιάζει σημαντικές διαφορές σε σύγκριση με τα δεδομένα του ERA-40. Τα κύρια πλεονεκτήματά της σε σχέση με αυτή του ERA-40 είναι η παροχή δεδομένων ανά 12 ώρες με χωρική διακύμανση σε 4D, βελτιωμένη οριζόντια ανάλυση (T255) (~ 79km), νέα ανάλυση για την σχετική υγρασία, βελτιωμένο μοντέλο φυσικής και βελτιωμένο σύστημα ελέγχου δεδομένων που αντλήθηκε βάση εμπειρίας από το ERA-40.

Ακόμα, τα δεδομένα βροχής που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της διδακτορικής διατριβής καταγράφηκαν από ένα δίκτυο 69 μετεωρολογικών σταθμών σε όλη την Κρήτη σε ημερήσια (χαμηλή) χρονική ανάλυση για το χρονικό διάστημα από 1979 - 2011. Τα δεδομένα βροχής παρέχονται από το δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών της περιφερειακής Διεύθυνση Υδάτων της Αποκεντρωμένης Διοίκησης Κρήτης, η οποία είναι υπεύθυνη και για τη συλλογή και τον έλεγχο των δεδομένων.

Ένα ορθογώνιο σύνορο έχει θεωρηθεί γύρω από την Κρήτη όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.1 το οποίο εσωκλείει την περιοχή ενδιαφέροντος. Στη δική μας περίπτωση η περιοχή μελέτης εκτείνεται μεταξύ 23.4°-26.4° Ανατολικά και 34.8°-35.7° Βόρεια. Επίσης, έχουν θεωρηθεί τομείς γύρω από την Κρήτη οι οποίοι φαίνονται αναλυτικά στην Εικόνα 4.1 και έχουν σημειωθεί με κόκκινο ως W, NW, SW, S, SE, E, NE και N ανάλογα με τον προσανατολισμό τους σε σχέση με το νησί της Κρήτης.



Εικόνα 4.1: Η περιοχή μελέτης και οι τομείς γύρω από την περιοχή μελέτης.

4.1.2 Κεραυνοί και βροχή

Τα δεδομένα που αφορούν στην κεραυνική δραστηριότητα προέρχονται από το Παγκόσμιο Δίκτυο Κεραυνών (GLN) και δίδονται από τη Unidata (<http://www.unidata.ucar.edu/data/lightning/gln.html>) για τη χρονική περίοδο από τον Σεπτεμβρίου του 2012 μέχρι και τον Ιούνιο του 2014. Το πεδίο της ανάλυσης αναφορικά με τους κεραυνούς ορίζεται σε μια ευρύτερη περιοχή γύρω από την Κρήτη και πιο συγκεκριμένα, από 22° - 28° ανατολικά και από 33.5° - 36.5° βόρεια. Τα στοιχεία της ημερομηνίας, του χρόνου καταγραφής και της τοποθεσίας (γεωγραφικό μήκος και πλάτος) είναι αυτά που αξιολογούνται σε συνδυασμό και με τα δεδομένα της βροχής. Το δίκτυο GLN αποτελεί ένα σύστημα τεχνολογίας αιχμής που αποτελείται από αισθητήρες ανίχνευσης πτώσης κεραυνού τοποθετημένους σε στρατηγικά σημεία σε περισσότερες από 150 τοποθεσίες φιλοξενίας διεθνώς. Η αποτελεσματικότητα αυτού του συστήματος φτάνει σε πολύ υψηλές τιμές οι οποίες αγγίζουν το 90-95% με αντίστοιχη ακρίβεια θέσης μικρότερη του ενός χιλιομέτρου. Τα δεδομένα των κεραυνών έχουν χρονική ανάλυση ενός λεπτού και αφορούν κεραυνούς μεταξύ νεφών και εδάφους αλλά και αυτούς που προκύπτουν μεταξύ των νεφών.

Περαιτέρω, τα δεδομένα βροχής των οποίων έγινε χρήση στα πλαίσια αυτής της διατριβής καταγράφηκαν από ένα δίκτυο 22 μετεωρολογικών σταθμών σε όλη την Κρήτη σε 10λεπτη

(υψηλή) χρονική ανάλυση για το χρονικό διάστημα Σεπτεμβρίου 2012 - Ιουνίου 2014. Τα δεδομένα βροχής παρέχονται από το δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ).

4.2 Περιοχή μελέτης

Η Κρήτη, είναι το μεγαλύτερο νησί στην Ελλάδα και το πέμπτο μεγαλύτερο στη Μεσόγειο καλύπτοντας μια έκταση $8,265\text{km}^2$, έχει μέσο υψόμετρο 482m, μέση κλίση 228 m/km και πληθυσμό 600,000 κατοίκους. Η Κρήτη έχει έντονα ορεινό χαρακτήρα με τα Λευκά Όρη στα δυτικά του νησιού, την οροσειρά Ίδη στο κέντρο της Κρήτης, και την Δίκτη και Θρυπτή στα ανατολικά. Το κλίμα της Κρήτης επηρεάζεται από την κλιματική ζώνη της Μεσογείου. Κατά κύριο λόγο χαρακτηρίζεται ως υπο-υγρό με παρατεταμένες, ξηρές και θερμές καλοκαιρινές περιόδους και υγρό, σχετικά ψυχρό χειμώνα.

Η έντονη ορογραφία της Κρήτης επηρεάζει πολύ το κλίμα στις διαφορετικές περιοχές. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα η θερμοκρασία μειώνεται ανάλογα με το υψόμετρο και το καλοκαίρι αυξάνεται από τις παράκτιες περιοχές προς την ενδοχώρα. Επίσης, οι βροχοπτώσεις δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στο νησί, με το βορειοδυτικό τμήμα του νησιού να λαμβάνει περισσότερη βροχόπτωση από το νοτιοανατολικό (Naoum and Tsanis 2003; Koutroulis et al. 2010; Iordanidou et al. 2015). Εξαιτίας της θέσης και της σύνθετης τοπογραφίας της, η Κρήτη πλήττεται συχνά από υφέσεις συνοπτικής κλίμακας που προκαλούν έντονες βροχές και πλημμύρες, ιδιαίτερος κατά τη διάρκεια του χειμώνα (Lolis et al. 2004). Η Κρήτη κυρίως επηρεάζεται από δύο τύπους Μεσογειακών υφέσεων: (i) υφέσεις από τα βορειοδυτικά που προέρχονται από την περιοχή της Γένοβας και (ii) υφέσεις από τα νοτιοδυτικά που προέρχονται νοτίως της οροσειράς του Άτλαντα (περιοχή της Σαχάρας) (Bartzokas et al. 2003; Lolis et al. 2004).

5 Αποτελέσματα

5.1 Υφέσεις και βροχή

5.1.1 Βροχές που προκλήθηκαν από υφέσεις

Από την ανάλυση των δεδομένων, βρέθηκε ότι οι περισσότερες από τις βροχοπτώσεις που συμβαίνουν στην Κρήτη λαμβάνουν χώρα το χειμώνα (50% της μέσης βροχής, > 65% της έντονης και >75% της σφοδρής βροχής) και ακολουθεί το φθινόπωρο και η άνοιξη. Το γεγονός αυτό είναι σύμφωνο και με την έρευνα των Koutroulis et al. (2010). Οι κατηγορίες βροχής όπως βρέθηκαν για την περιοχή μελέτης (Κρήτη) φαίνονται στον Πίνακα 5.1. Λαμβάνοντας υπόψιν όλους τους διαθέσιμους βροχομετρικούς σταθμούς, ο ετήσιος μέσος όρος γεγονότων ανέρχεται σε 110 μέσης, 30 έντονης και 10 σφοδρής βροχοπτώσης ετησίως σε διαφορετικές τοποθεσίες στην Κρήτη. Ο αριθμός των βροχοπτώσεων ανά κατηγορία έντασης και εποχή για την περίοδο της ανάλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2. Επιπλέον έχει υπολογιστεί το ποσοστό των βροχοπτώσεων που δυνητικά έχει προκληθεί από υφέσεις.

Πίνακας 5.1: Οι κατηγορίες βροχής για την περιοχή μελέτης (Κρήτη).

Κατηγορία βροχής	Ύψος ημερήσιας βροχής (mm/day)
Μέση βροχόπτωση: (50° -95°):	10-50
Έντονη βροχόπτωση: (95° -99.5°):	50-100
Σφοδρή βροχόπτωση: (>99.5°):	100

Πίνακας 5.2: Τα γεγονότα βροχής στην Κρήτη κατά την περίοδο 1979-2011. Οι μη χρωματισμένες στήλες αφορούν τα γεγονότα βροχής και οι γκρι στήλες τη σχετική συχνότητα (%) σύμπτωσης βροχής-ύφεσης.

	Μέση βροχή		Έντονη βροχή		Σφοδρή βροχή		Μέση σύμπτωση
	Events	%	Events	%	Events	%	
Ετήσια	3402	54	966	70	278	76	66
Φθινόπωρο	846	51	257	70	78	73	65
Χειμώνας	1720	54	540	68	159	76	66
Άνοιξη	760	59	156	75	37	81	72

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.2 το μεγαλύτερο ποσοστό έντονων και σφοδρών βροχοπτώσεων προκαλούνται από τις υφέσεις. Μάλιστα, το 70% των ετήσιων εκδηλώσεων έντονης βροχής και το 76% των ετήσιων εκδηλώσεων σφοδρής βροχής σχετίζονται με την εμφάνιση υφέσεων. Αντίθετα, το 54% των ετήσιων εκδηλώσεων μέσης βροχής συνδέεται με την εμφάνιση υφέσεων. Ετησίως, το 66% των βροχοπτώσεων που συμβαίνουν στην Κρήτη συνδέονται με κυκλωνικά συστήματα σε συμφωνία με τους Catto et al. (2012) και Hawcroft et al. (2012), οι οποίοι βρίσκουν περίπου 60-70% συμβολή των υποτροπικών κυκλώνων στην βροχόπτωση βόρεια των 30°N. Στην εποχική ανάλυση, φαίνεται ότι τόσο για τις έντονες όσο και για τις σφοδρές βροχοπτώσεις η σύμπτωση με την εμφάνιση κυκλωνικής δραστηριότητας είναι μεγαλύτερη την άνοιξη (έως και 80% σύμπτωση για τις σφοδρές βροχοπτώσεις) ενώ ακολουθούν ο χειμώνας και το φθινόπωρο. Οι υπόλοιπες βροχοπτώσεις που δεν βρέθηκε να συνδέονται με υφέσεις, αφορούν είτε χαμηλά τοπικής κλίμακας που δεν μπορούν να γίνουν αντιληπτά από τον αλγόριθμο MS Scheme ή είναι βροχές κατακόρυφης μεταφοράς που δεν σχετίζονται με τη διέλευση κάποιου μετώπου ή προκαλούνται λόγω της σύνθετης τοπογραφίας και της έντονης ορογραφίας που παρατηρείται στην Κρήτη (Naoum and Tsanis 2003; Lionello et al. 2006).

5.1.2 Τα χαρακτηριστικά των ενεργών και επιδρώντων υφέσεων

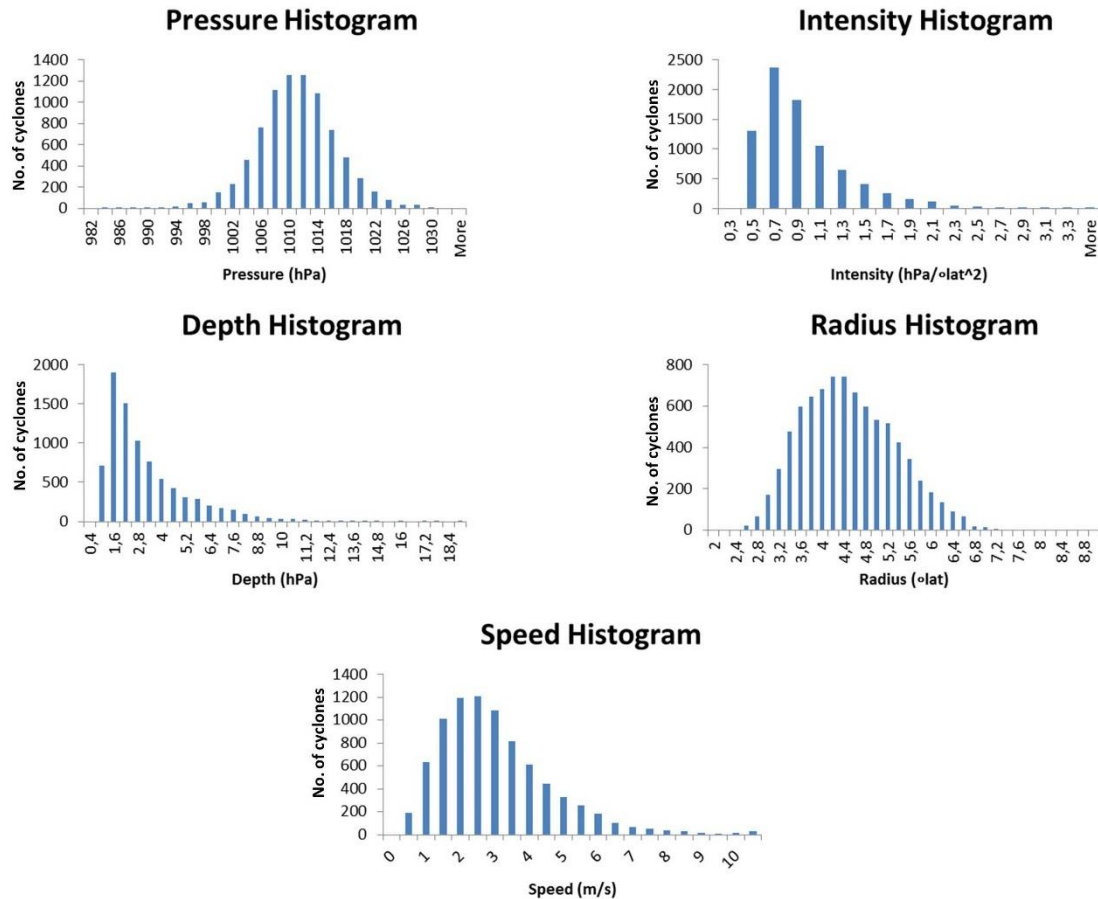
Σημαντικές δυναμικές παράμετροι των υφέσεων αποτελούν η πίεση, η ένταση, το βάθος, η ακτίνα και η ταχύτητα διάδοσης τους. Αυτά τα χαρακτηριστικά αποτελούν ενδεικτικά κριτήρια της σημασίας και της επιρροής των υφέσεων (Simmonds and Keay 2000). Τα ιστογράμματα των παραμέτρων αυτών παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.1, και αφορούν το κέντρο των υφέσεων, οι οποίες έχουν επαρκώς μικρή απόσταση από το όριο που έχουμε ορίσει σε σχέση με την Κρήτη. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη θέση τους, κρίνοντας από την απόστασή τους από το καθορισμένο όριο γύρω από την Κρήτη και την ακτίνα τους, θα μπορούσαν ενδεχομένως να προκαλέσουν επεισόδιο βροχής στην Κρήτη, όπως περιεγράφηκε στο κεφάλαιο 3.

Σύμφωνα με τα αντίστοιχα ιστογράμματα, οι τιμές της πίεσης και της ακτίνας ακολουθούν κανονικές κατανομές. Από την άλλη, η ένταση, το βάθος και η ταχύτητα διάδοσης παρουσιάζουν ασυμμετρία προς τα αριστερά. Περισσότερο από το 85% των τιμών πίεσης είναι στο εύρος από 1.002 – 1018 hPa με μέση πίεση 1010 hPa. Έτσι, οι περισσότερες

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα

υφέσεις γύρω από την Κρήτη είναι ασθενείς και μέτριες σύμφωνα με την ταξινόμηση του Maheras et al. (2001). Περίπου το 80% των τιμών έντασης εκτείνονται από $0.3-1.1 \text{ hPa}^\circ\text{lat}^{-2}$ και με μέση ένταση $0.86 \text{ hPa}^\circ\text{lat}^{-2}$. Επιπλέον, η πλειοψηφία των τιμών του βάθους των υφέσεων είναι στην κλίμακα $0.4-4.6 \text{ hPa}$ με μέσο βάθος 2.9 hPa το οποίο είναι κοντά στα $2.15-2.17 \text{ hPa}$ που βρέθηκε από τους Flocas et al. (2010) εντός της περιοχής της Ανατολικής Μεσογείου. Επίσης, οι τιμές ακτίνας μεταξύ $3.2^\circ\text{lat}-5.4^\circ\text{lat}$ αφορούν το 80% των υφέσεων και η αντίστοιχη μέση ακτίνα είναι 4.4°lat . Αυτό είναι σε συμφωνία με τους Trigo et al. (1999), οι οποίοι βρίσκουν περίπου κατά μέσο όρο 4.5°lat ακτίνα ύφεσης (ή 500 km) στην περιοχή του Αιγαίου το χειμώνα και την άνοιξη. Σε γενικές γραμμές, η ακτίνα των Μεσογειακών υφέσεων είναι σημαντικά μικρότερη από εκείνες των Ατλαντικών συνοπτικών συστημάτων η οποία φτάνει τις 18°lat (Lionello et al. 2006). Τέλος, η πλειονότητα των τιμών ταχύτητας διάδοσης είναι μεταξύ 0.5 m/s έως 4.5 m/s με μέση τιμή 2.8 m/s .

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα



Εικόνα 5.1: Τα ιστογράμματα που αφορούν στις δυναμικές παραμέτρους των υφέσεων (πίεση, ένταση, βάθος, ακτίνα, ταχύτητα) που βρίσκονται σε θέση επιρροής σε σχέση με την Κρήτη για τη χρονική περίοδο 1979-2011.

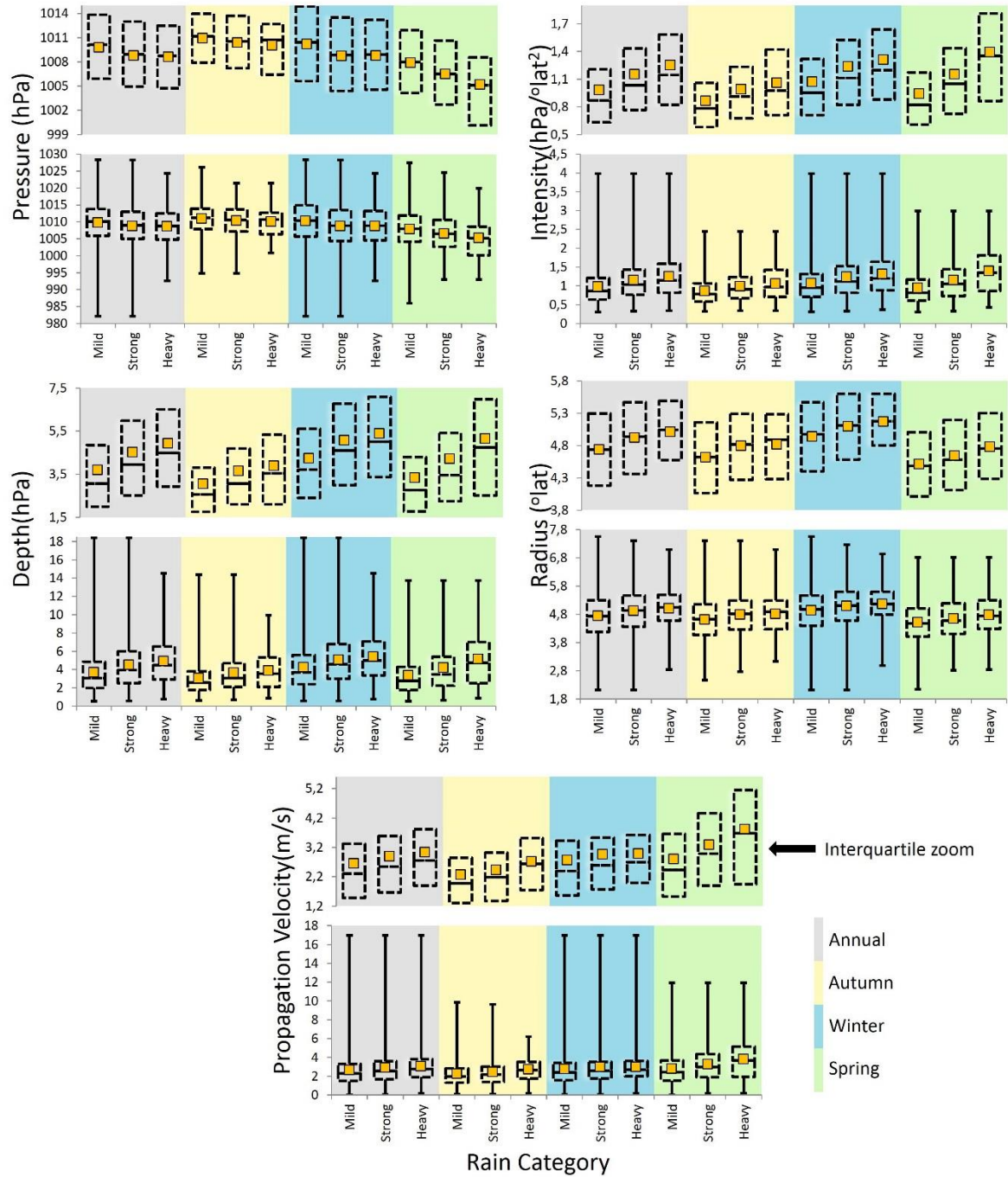
Στην Εικόνα 5.2 παρουσιάζονται σε μορφή box-whisker η πίεση, η ένταση, το βάθος, η ακτίνα και η ταχύτητα διάδοσης των επιδρώντων υφέσεων. Για κάθε ένα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά αποτυπώνονται στο διάγραμμα για κάθε κατηγορία βροχής (άξονας x) και κάθε εποχή (το χρώμα του φόντου) οι κύριες στατιστικές τους ιδιότητες.

Στο γράφημα της πίεσης φαίνεται μείωση της πίεσης των υφέσεων με την αύξηση της έντασης της βροχής. Οι χαμηλότερες τιμές πίεσης εντοπίζονται την άνοιξη και οι υψηλότερες το φθινόπωρο. Από το γράφημα της έντασης παρατηρούμε ότι βροχές με μεγαλύτερη συσσώρευση σχετίζονται με μεγαλύτερης έντασης υφέσεις. Επιπλέον, οι υψηλότερες εντάσεις παρατηρήθηκαν για το χειμώνα και οι χαμηλότερες το φθινόπωρο. Ανάλογα συμπεράσματα προκύπτουν και για το βάθος, το οποίο μάλιστα θεωρείται πολύ

ικανοποιητικό μέτρο επιρροής της ύφεσης με υφέσεις μεγαλύτερου βάθους να συνδέονται με βροχές υψηλότερης συσσώρευσης (Simmonds and Keay 2000). Μικρές είναι οι διαφορές στην ακτίνα για τις διαφορετικές κατηγορίες βροχής με μεγαλύτερες τιμές ακτίνας να παρατηρούνται το χειμώνα και μικρότερες την άνοιξη. Τέλος, η μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης παρατηρείται για την περίπτωση των σφοδρών βροχοπτώσεων σε σύγκριση με τις άλλες δύο κατηγορίες βροχής, με τις υψηλότερες ταχύτητες να σημειώνονται το χειμώνα και τις χαμηλότερες την άνοιξη. Στους Πίνακες 5.3 και Πίνακας 5.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των 90% και 95% επίπεδων σημαντικότητας για τις διαφορές των δυναμικών παραμέτρων των υφέσεων στις διαφορετικές κατηγορίες βροχής και τις διαφορετικές εποχές, αντίστοιχα.

Στην Εικόνα 5.3 παρουσιάζονται οι διαφορές των δυναμικών παραμέτρων των υφέσεων ανά τομέα. Στην αριστερή στήλη είναι η μέση τιμή των παραμέτρων για τις υφέσεις που σχετίζονται με οποιαδήποτε κατηγορία βροχής και στη δεξιά στήλη παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τις σφοδρές βροχοπτώσεις. Γενικά για τους διαφορετικούς τομείς επιβεβαιώνονται τα αποτελέσματα της Εικόνα 5.2. Πιο συγκεκριμένα, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων τα δυναμικά χαρακτηριστικά των υφέσεων είναι πιο “ακραία” στις υφέσεις που συνδέονται με βροχοπτώσεις μεγαλύτερης έντασης.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα



Εικόνα 5.2: Ετήσια και εποχιακή απεικόνιση των βασικών χαρακτηριστικών των επιδρώντων υφέσεων για τη χρονική περίοδο 1979-2011 σε box-whisker μορφή.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα

Πίνακας 5.3: Τα αποτελέσματα στατιστικής σημαντικότητας των διαφορών μεταξύ των διαφορετικών κατηγοριών βροχής των βασικών χαρακτηριστικών των επιδρώντων υφέσεων για τη χρονική περίοδο 1979-2011. Με γκρι φόντο σημειώνονται οι διαφορές που δεν παρουσιάζουν στατιστική σημαντικότητα στο 90% ή 95% επίπεδο. Με 1 σημειώνονται τα αποτελέσματα που έχουν σημαντικότητα στο 95% ενώ με 0 αυτά που έχουν σημαντικότητα στο 90%.

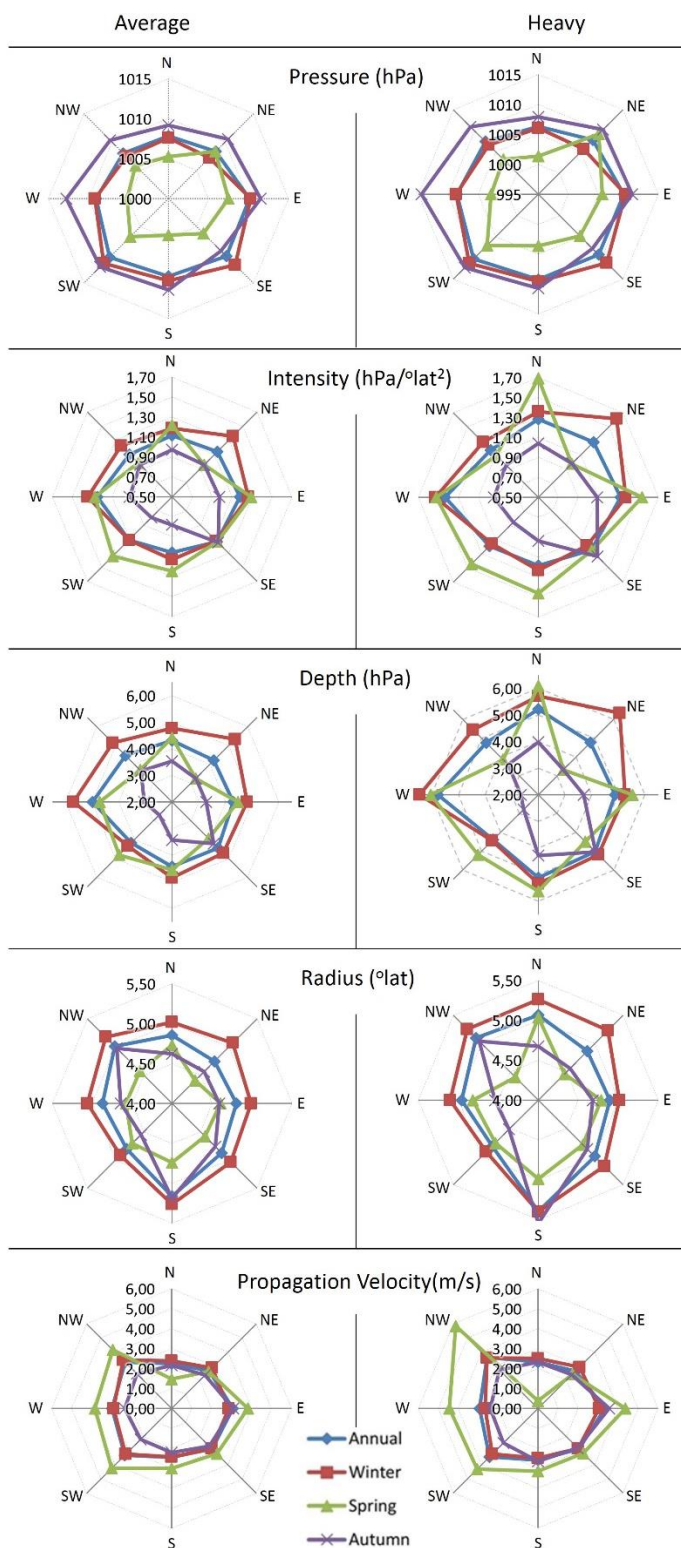
Season	Mild-strong	Mild-heavy	Strong-heavy
Pressure			
Annual	1	1	0
Autumn	1	1	0
Winter	1	1	0
Spring	1	1	1
Intensity			
Annual	1	1	1
Autumn	1	1	0
Winter	1	1	1
Spring	1	1	1
Depth			
Annual	1	1	1
Autumn	1	1	0
Winter	1	1	1
Spring	1	1	1
Radius			
Annual	1	1	1
Autumn	1	1	0
Winter	1	1	1
Spring	0	1	0
Propagation Velocity			
Annual	1	1	1
Autumn	1	1	1
Winter	1	1	0
Spring	1	1	1

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα

Πίνακας 5.4: Τα αποτελέσματα στατιστικής σημαντικότητας των διαφορών μεταξύ των διαφορετικών εποχών των βασικών χαρακτηριστικών των επιδρώντων υφέσεων για τη χρονική περίοδο 1979-2011. Με γκρι φόντο σημειώνονται οι διαφορές που δεν παρουσιάζουν στατιστική σημαντικότητα στο 90% ή 95% επίπεδο. Με 1 σημειώνονται τα αποτελέσματα που έχουν σημαντικότητα στο 95% ενώ με 0 αυτά που έχουν σημαντικότητα στο 90% επίπεδο σημαντικότητας.

Rain Category	Winter-spring	Winter-autumn	Winter-annual	Spring-autumn	Spring-annual	Autumn-annual
Pressure						
Mild	1	1	1	1	1	1
Strong	1	1	0	1	1	1
Heavy	1	1	0	1	1	1
Intensity						
Mild	1	1	1	1	1	1
Strong	1	1	1	1	0	1
Heavy	0	1	0	1	1	1
Depth						
Mild	1	1	1	1	1	1
Strong	1	1	1	1	1	1
Heavy	1	1	1	1	0	1
Radius						
Mild	1	1	1	1	1	1
Strong	1	1	1	1	1	1
Heavy	1	1	1	0	1	1
Propagation Velocity						
Mild	0	1	1	1	1	1
Strong	1	1	0	1	1	1
Heavy	1	0	0	1	1	0

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα



Εικόνα 5.3: Εποχική και ετήσια παρουσία των δυναμικών παραμέτρων των ενεργών υφέσεων για κάθε τομέα που έχει θεωρηθεί γύρω από την Κρήτη, για την περίοδο 1979-2011.

5.1.3 Η προέλευση και η θέση των ενεργών και επιδρώντων υφέσεων

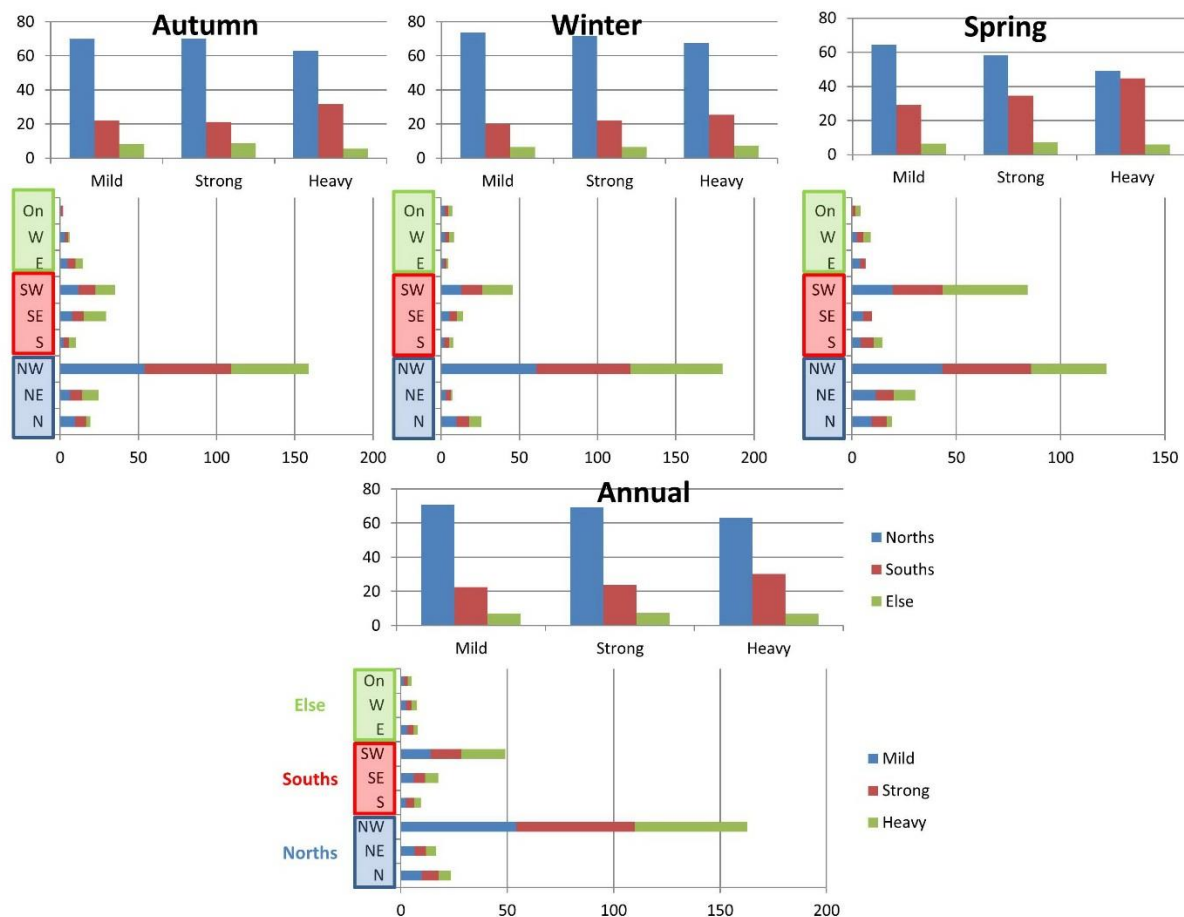
Σημαντικά χαρακτηριστικά των υπό ανάλυση υφέσεων είναι η προέλευση και η θέση από την οποία προκαλούν βροχόπτωση στην Κρήτη. Οι περισσότεροι από τις ενεργές υφέσεις προέρχονται από βορειοδυτικά και νοτιοδυτικά της Κρήτης και έχουν νοτιοανατολικές και βορειοανατολικές κατευθύνσεις αντίστοιχα, για την πλειοψηφία των περιπτώσεων. Στην Εικόνα 5.4 και στην Εικόνα 5.5 παρουσιάζονται λεπτομερώς η προέλευση και η θέση των υφέσεων για καθέναν από τους τομείς που έχουν θεωρηθεί, τόσο εποχικά όσο και σε ετήσια βάση. Οι τομείς που έχουν θεωρηθεί ως περιοχές ανάλυσης γύρω από την Κρήτη φαίνονται αναλυτικά στην Εικόνα 4.1 και έχουν σημειωθεί με κόκκινο ως W, NW, SW, S, SE, E, NE και N ανάλογα με τη θέση τους αναφορικά με την Κρήτη. Ακολουθεί μια σύγκριση των σχετικών συχνοτήτων της προέλευσης των κέντρων των ενεργών υφέσεων και της θέσης των επιδρώντων υφέσεων στους τομείς. Σε αυτό το σημείο να τονισθεί ότι οι περιοχές των τομέων δεν είναι ίσοκατανεμημένες.

Στην Εικόνα 5.4 φαίνεται μια αναλυτική παρουσίαση της προέλευσης των ενεργών υφεσιακών συστημάτων, εποχιακά και ετήσια, για κάθε κατηγορία βροχής και για κάθε τομέα γύρω από την Κρήτη. Για κάθε εποχή παρουσιάζονται δύο γραφήματα όπου το πρώτο δείχνει τη σχετική συχνότητα συνολικά για τη βόρεια, τη νότια και τις υπόλοιπες κατευθύνσεις ενώ το δεύτερο παρουσιάζει τα αντίστοιχα αποτελέσματα για κάθε τομέα ξεχωριστά, όπως αυτοί έχουν χωριστεί στην Εικόνα 4.1. Σε ετήσια βάση, περίπου το 70-80% των κέντρων των ενεργών υφέσεων προέρχονται βορειοδυτικά και νοτιοδυτικά της Κρήτης. Πιο συγκεκριμένα, περίπου το 55% των υφέσεων έρχονται από βορειοδυτικά και περίπου το 15% από νοτιοδυτικά της Κρήτης. Όσον αφορά την εποχικότητα, μπορεί να παρατηρηθεί ότι το ποσοστό των βορειοδυτικών υφέσεων το χειμώνα είναι μεγαλύτερο (~60%) και την άνοιξη μικρότερο (~45%), ενώ το ακριβώς αντίθετο ισχύει για τις υφέσεις που προέρχονται από τα νοτιοδυτικά. Αναφορικά με τις διαφορετικές κατηγορίες βροχής, οι υφέσεις με νοτιοδυτική προέλευση αυξάνονται για μεγαλύτερες βροχοπτώσεις σε σχέση με τις μικρότερες, ενώ το αντίθετο συμβαίνει με τις βορειοδυτικές υφέσεις στην αντίστοιχη περίπτωση. Αυτό συμβαίνει αντίστοιχα σε όλες τις εποχές αλλά είναι πιο έντονο την άνοιξη όπου οι υφέσεις που έρχονται από νοτιοδυτικά και εμπλέκονται με σφοδρές βροχοπτώσεις

ξεπερνούν το 40%. Οι Flocas et al. (2010) και Trigo et al. (1999) στην έρευνά τους υποστηρίζουν ότι υπάρχει μια παρατηρούμενη αύξηση των υφέσεων που έρχονται από τη βόρεια Αφρική την άνοιξη σε σύγκριση με τις άλλες εποχές, σε συμφωνία με τα αποτελέσματα/ευρήματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

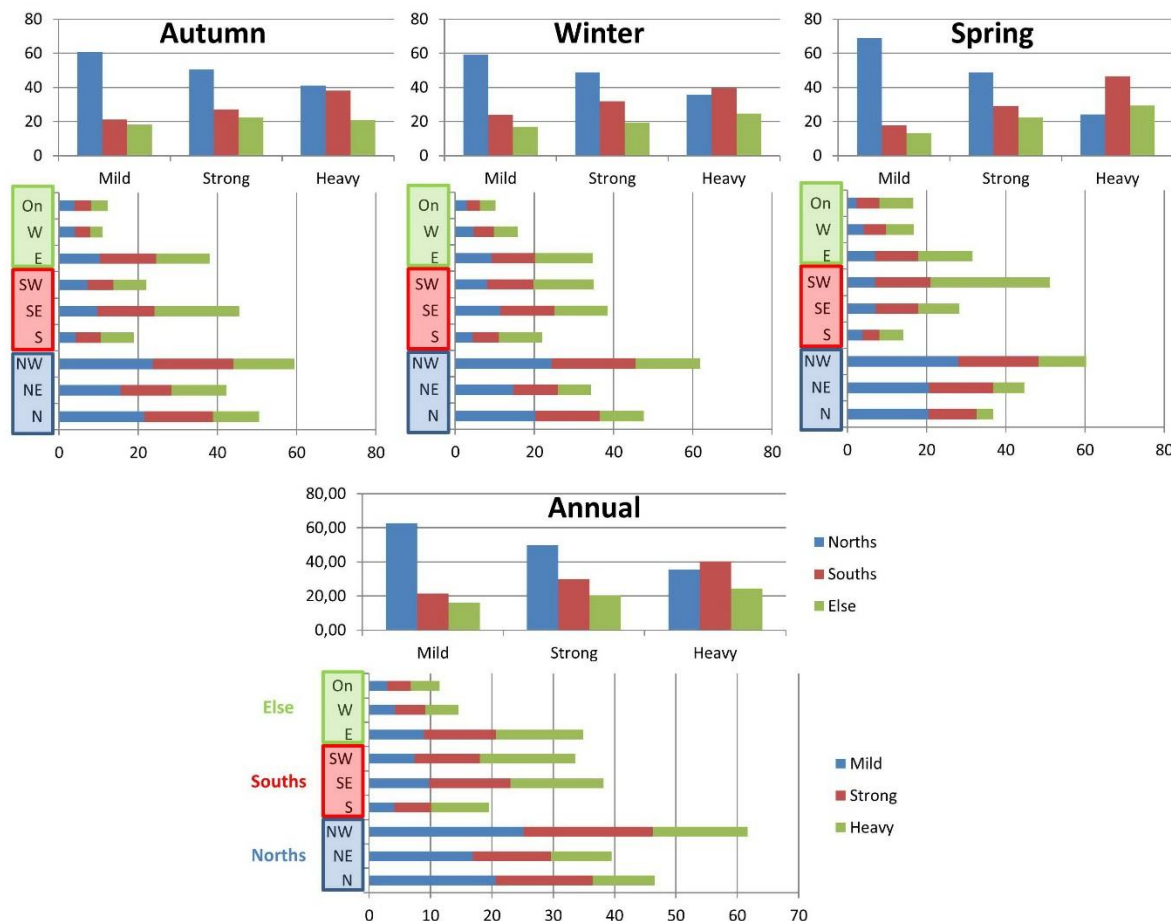
Οι θέσεις των επιδρώντων υφέσεων παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.5 εποχιακά και ετήσια, για κάθε κατηγορία βροχής και για κάθε τομέα γύρω από την Κρήτη. Για αμφοότερες μέσες και έντονες βροχοπτώσεις η πλειονότητα των κέντρων των υφέσεων βρίσκονται βόρεια (N, NW, SW) της Κρήτης, ξεπερνώντας το 50%. Αναφορικά με τις διαφορετικές κατηγορίες βροχής, το ποσοστό των επιδρώντων υφέσεων με νότια τοποθέτηση (SE, SW, S) αυξάνεται για μεγαλύτερες βροχοπτώσεις σε σχέση με τις μικρότερες, ενώ το αντίθετο συμβαίνει με τις επιδρώντες υφέσεις με βόρεια τοποθέτηση (NE, NW, N) στην αντίστοιχη περίπτωση. Οι υφέσεις που βρίσκονται βορειοδυτικά και νοτιοανατολικά είναι αυτές με τα μεγαλύτερα ποσοστά στις βόρειες και νότιες κατευθύνσεις. Αναφορικά με την εποχικότητα, σε όλες τις περιπτώσεις, υπάρχει μείωση στον αριθμό των υφέσεων στις βόρειες κατευθύνσεις με την αύξηση της βροχόπτωσης, με ανάλογη αύξηση των υφέσεων που βρίσκονται σε νότιες κατευθύνσεις. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα παρατηρείται την άνοιξη, όπου οι υφέσεις που βρίσκονται βορείως μειώνονται από 69% που είναι στις περιπτώσεις μέσης βροχής, στο 32% για τις έντονες βροχοπτώσεις, ενώ αντίθετα οι νότιες υφέσεις αυξάνονται από 18% στο 47%.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα



Εικόνα 5.4: Ετήσιες και εποχιακές σχετικές συχνότητες (%) της προέλευσης των ενεργών υφέσεων για τη χρονική περίοδο 1979-2011.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα

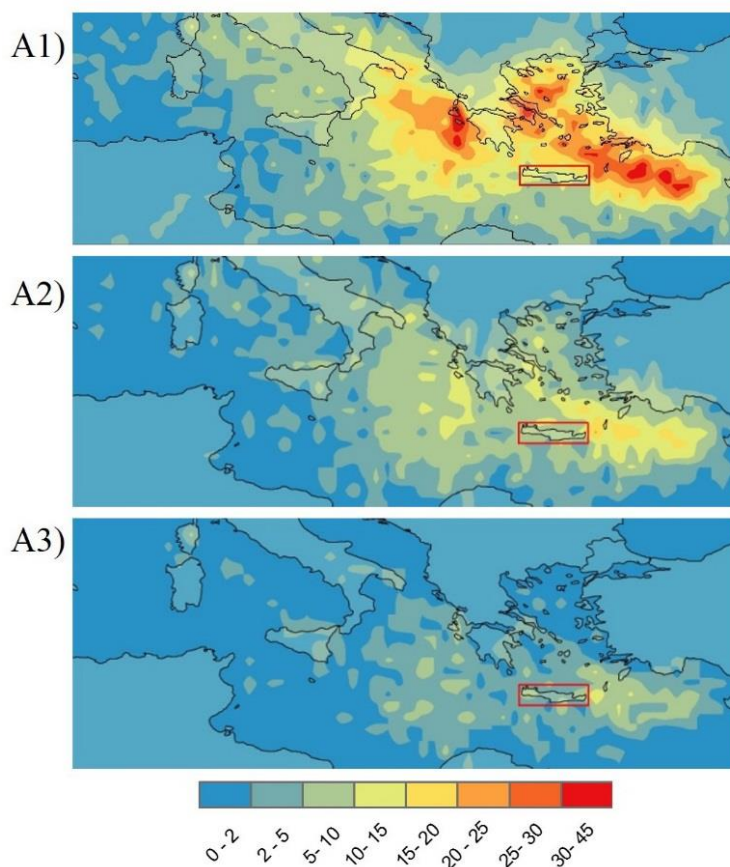


Εικόνα 5.5: Ετήσιες και εποχιακές σχετικές συχνότητες (%) της θέσης των επιδρώντων υφέσεων για τη χρονική περίοδο 1979-2011.

5.1.4 Χωρική κατανομή των ενεργών και επιδρώντων υφέσεων

Ο αριθμός των υφέσεων που είναι είτε ενεργές είτε επιδρώντες για την περίοδο 1979-2011 παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.6. Στις περιπτώσεις των μέσων βροχοπτώσεων η πλειοψηφία των υπεύθυνων υφέσεων βρίσκονται βόρεια και ανατολικά της Κρήτης αλλά και ανατολικά της Πελοποννήσου. Οι υφέσεις στις οποίες οφείλονται οι έντονες και σφοδρές βροχοπτώσεις εντοπίζονται μετατοπισμένες προς πιο νότιες κατευθύνσεις. Πιο συγκεκριμένα, οι περισσότερες υφέσεις σχετιζόμενες με έντονες βροχές εντοπίζονται ανατολικά της Κρήτης, κάτι το οποίο δεν είναι τόσο έντονο για αυτές που σχετίζονται με σφοδρές βροχοπτώσεις. Στις σφοδρές βροχοπτώσεις οι υφέσεις είναι πιο ομοιόμορφα

κατανεμημένες γύρω από το νησί και στην ευρύτερη περιοχή του Ιονίου. Ο αριθμός των υφέσεων είναι μικρότερος για τα γεγονότα μεγαλύτερης βροχόπτωσης, καθώς τα γεγονότα αυτά κατατάσσονται στα ανώτερα εκατοστημόρια ως ακραία και συνεπώς είναι λιγότερα.



Εικόνα 5.6: Ο αριθμός των ενεργών και επιδρώντων υφέσεων για τη χρονική περίοδο 1979-2011 για A1) μέση, A2) έντονη και A3) σφοδρή βροχόπτωση.

5.1.5 Πιθανοτικοί χάρτες

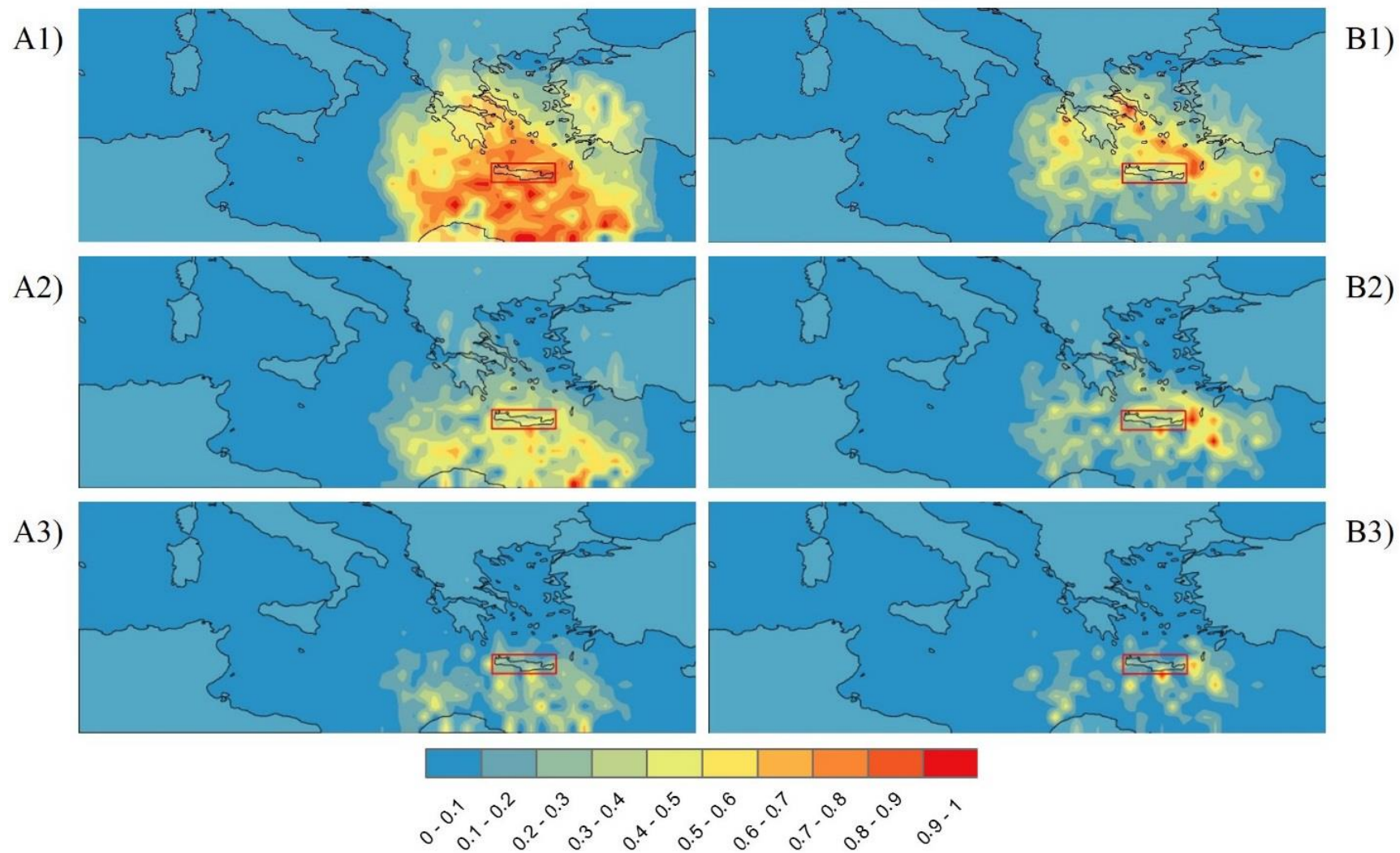
Η πιθανότητα να είναι επιδρούσα μια ύφεση που διέρχεται από την περιοχή της νοτιοανατολικής Μεσογείου, για την απλή και σταθμισμένη πιθανότητα (WNP) και για τις τρεις κατηγορίες βροχής για την περίοδο ανάλυσης 1979-2011 φαίνεται στην Εικόνα 5.7. Η πιθανότητα μιας διερχόμενης ύφεσης να προκαλέσει βροχή στην Κρήτη είναι υψηλότερη όταν περνά νότια της Κρήτης γεγονός που γίνεται πιο έντονο για τις βροχές μεγαλύτερης συσσώρευσης. Αντιθέτως, η αντίστοιχη WNP δίνει έμφαση στην περιοχή

ανατολικά και βόρεια της Κρήτης κάτι το οποίο αλλάζει για τις σφοδρές βροχοπτώσεις όπου οι περιοχές με τη μεγαλύτερη έμφαση βρίσκονται νότια της Κρήτης.

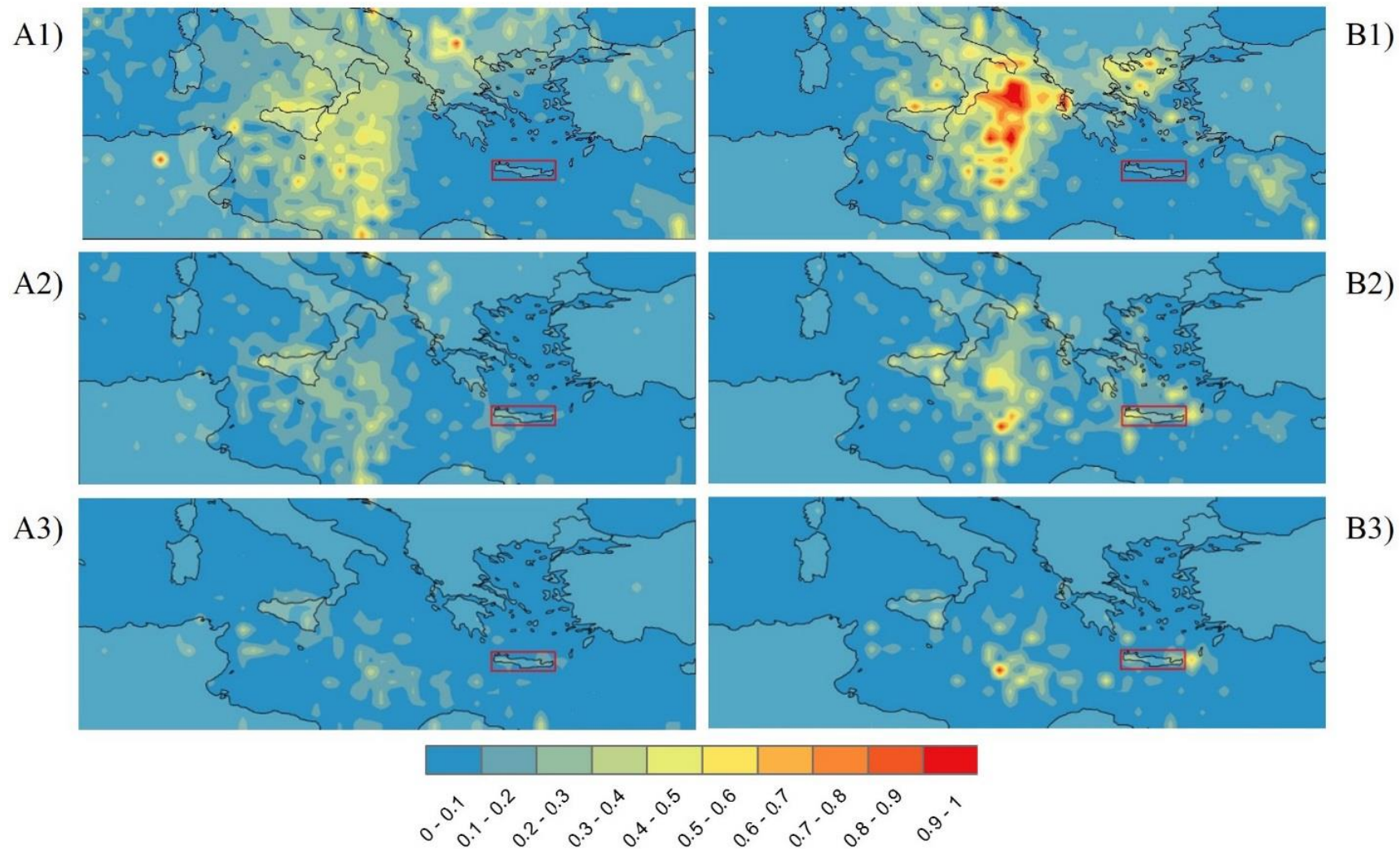
Η πιθανότητα να είναι ενεργή μια ύφεση που διέρχεται από την περιοχή της νοτιοανατολικής Μεσογείου για την απλή και σταθμισμένη πιθανότητα και για τις τρεις κατηγορίες βροχής για την περίοδο ανάλυσης 1979-2011 φαίνεται στην Εικόνα 5.8. Όπως είναι αναμενόμενο, οι ενεργές υφέσεις έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα σε μεγαλύτερη απόσταση από την Κρήτη σε σχέση με τις επιδρώντες υφέσεις. Επίσης οι πιθανοτικοί χάρτες που αφορούν γεγονότα υψηλότερης βροχόπτωσης έχουν μικρότερες πιθανότητες σε σχέση με αυτούς που σχετίζονται με γεγονότα πιο μέτριας βροχόπτωσης. Αυτό συμβαίνει διότι οι μικρότερης έντασης βροχοπτώσεις είναι περισσότερες και άρα σε αυτές αντιστοιχεί μεγαλύτερος αριθμός υφέσεων σε σχέση με τον συνολικό πληθυσμό τους με αποτέλεσμα μεγαλύτερες πιθανότητες. Παρατηρούμε ότι οι υφέσεις νότια της Ιταλίας έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να είναι ενεργές για γεγονότα μέσης βροχόπτωσης και στην περίπτωση της απλής πιθανότητας αλλά και στην WNP όπου επισημαίνεται έντονα η συγκεκριμένη περιοχή. Στις κατηγορίες υψηλότερης βροχόπτωσης, οι υφέσεις που ευθύνονται εμφανίζονται να έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα σε περιοχές μετατοπισμένες σε πιο νότιες κατευθύνσεις. Πιο συγκεκριμένα, η ευρύτερη περιοχή ανατολικά της Σικελίας αποτελεί πέρασμα για τις περισσότερες υφέσεις που συνδέονται με γεγονότα έντονης βροχόπτωσης, ενώ για τις υφέσεις που σχετίζονται με σφοδρές βροχοπτώσεις το κύριο πέρασμα τους φαίνεται να εντοπίζεται νοτιότερα προς το Λιβυκό πέλαγος και στην ευρύτερη περιοχή του δυτικού Ιονίου πελάγους. Και στις δύο περιπτώσεις των πιθανοτικών χαρτών (απλός και WNP) οι περιοχές ενδιαφέροντος δεν διαφέρουν σημαντικά. Όμως ο WNP τονίζει επιπροσθέτως περιοχές όπου εκτός της αυξημένης πιθανότητας μια διερχόμενη ύφεση να είναι ενεργή, ο αριθμός των ενεργών υφέσεων είναι μεγάλος. Δηλαδή, σε αυτή την περίπτωση λαμβάνεται υπόψιν και το πλήθος των ενεργών υφέσεων που διέρχονται από την περιοχή.

Η πιθανότητα να είναι ενεργή μία ακραία ύφεση που διέρχεται από την περιοχή της νοτιοανατολικής Μεσογείου για την απλή και σταθμισμένη πιθανότητα και για τις 3 κατηγορίες βροχής για την περίοδο ανάλυσης 1979-2011 φαίνεται στην Εικόνα 5.9. Οι υφέσεις για τις οποίες υπολογίζονται οι πιθανότητες επιλέχθηκαν έτσι ώστε οι τιμές στα χαρακτηριστικά του βάθους, της ακτίνας και της έντασής τους να βρίσκονται στα άκρα

των αντίστοιχων κατανομών. Οι περιοχές όπου οι πιθανότητες είναι υψηλότερες φαίνονται να είναι αντίστοιχες με αυτές στην Εικόνα 5.8. Όμως, στην περίπτωση των ακραίων υφέσεων (Εικόνα 5.9) οι πιθανότητες είναι πολύ υψηλότερες ξεπερνώντας το 70% σε πολλές περιπτώσεις, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι υφέσεις με ακραία χαρακτηριστικά σε περιοχές που αποτελούν πέρασμα ενεργών υφέσεων έχουν αυξημένη πιθανότητα να προκαλέσουν επεισόδια βροχής στην Κρήτη. Αναφορικά με τις τρεις κατηγορίες βροχής, παρατηρούμε και σε αυτή την περίπτωση μετατόπιση των υψηλών πιθανοτήτων νότια για μεγαλύτερης έντασης βροχοπτώσεις.

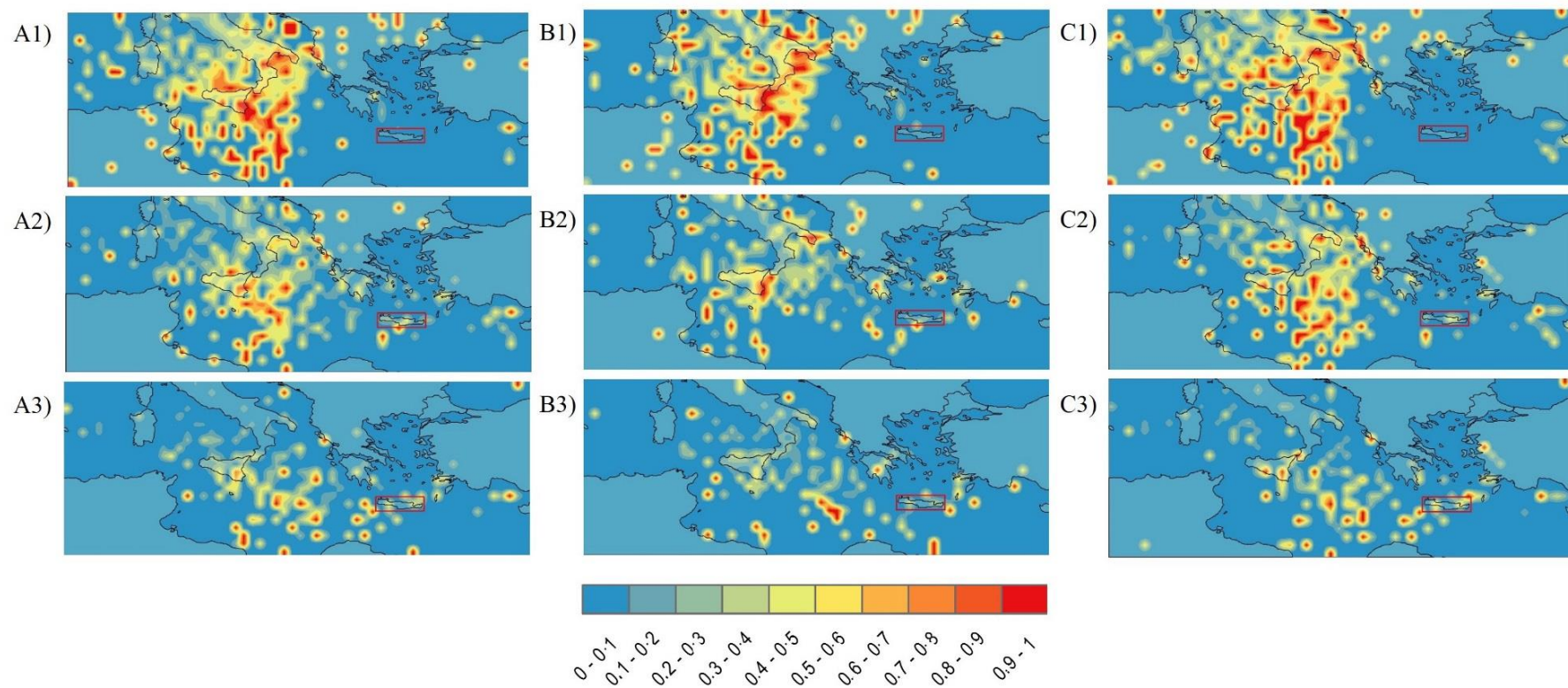


Εικόνα 5.7: Πιθανοτικός χάρτης Α) απλός και Β) WNP για τις επιδρώντες υφέσεις κατά την περίοδο ανάλυσης 1979-2011 που προκάλεσαν 1) μέση, 2) έντονη και 3) σφοδρή βροχόπτωση.



Εικόνα 5.8: Πιθανοτικός χάρτης Α) απλός και Β) WNP για τις ενεργές υφέσεις κατά την περίοδο ανάλυσης 1979-2011 που προκάλεσαν 1) μέση, 2) έντονη και 3) σφοδρή βροχόπτωση

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα



Εικόνα 5.9: Πιθανοτικός χάρτης για τις ακραίες ενεργές υφέσεις κατά την περίοδο ανάλυσης 1979-2011 που προκάλεσαν 1) μέση, 2) έντονη και 3) σφοδρή βροχόπτωση. Τα χαρακτηριστικά ως προς τα οποία επιλέχθηκαν οι ακραίες υφέσεις είναι Α) το βάθος, Β) η ακτίνα και Γ) η έντασή τους.

5.1.6 Αξιολόγηση των πιθανοτικών χαρτών

Οι δυνατότητες πρόβλεψης της βροχόπτωσης των πιθανοτικών χαρτών δοκιμάζονται με τυχαίο διαχωρισμό του συνόλου των υφέσεων σε ομάδες δοκιμής (10% των δεδομένων) και εκπαίδευσης (90% δεδομένων), όπως αυτό παρουσιάστηκε στο κομμάτι της μεθοδολογίας. Οι πιθανοτικοί χάρτες επίσης δοκιμάζονται για συγκεκριμένες περιπτώσεις πλημμύρας στην Κρήτη.

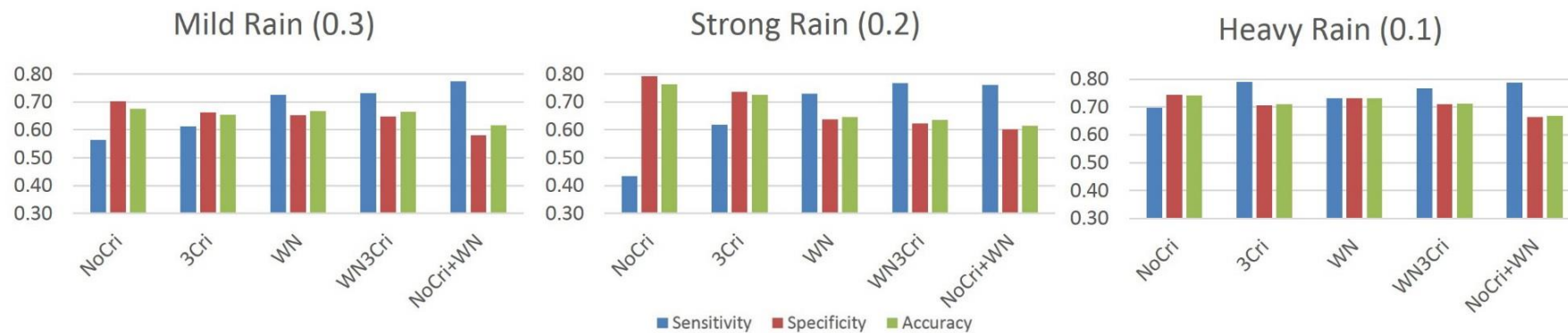
Στην Εικόνα 5.10 φαίνονται τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των πιθανοτικών χαρτών, όπου μεμονωμένοι ή σε συνδυασμό οι πιθανοτικοί χάρτες εξετάζονται για τις τρεις κατηγορίες της βροχής. Τα κατώφλια της πιθανότητας επιλέγονται έτσι ώστε να δίνουν τα βέλτιστα αποτελέσματα για τα τρία στατιστικά μέτρα της ευαισθησίας, της ειδικότητας και ακρίβειας. Για τα επιλεγμένα κατώφλια της πιθανότητας σε κάθε κατηγορία βροχής, ο μέσος όρος όλων των μεθόδων των πιθανοτικών χαρτών, δίνει αποτελέσματα μεγαλύτερα από 0.6 και για τα τρία στατιστικά μέτρα. Όταν τίθεται θέμα βελτιστοποίησης μεταξύ ευαισθησίας και ειδικότητας, προτιμάται η ευαισθησία να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη, καθώς το ζητούμενο είναι να αναγνωρίζονται όσο το δυνατόν περισσότερες περιπτώσεις βροχοπτώσεων. Αυτό είναι ιδιαίτερης σημασίας, κυρίως για έντονες και σφοδρές περιπτώσεις βροχής, καθώς η ευαισθησία αντιπροσωπεύει το εάν εντοπίζονται οι ενεργές υφέσεις κατά τη διέλευσή τους. Είναι προφανές ότι οι έντονες και σφοδρές βροχοπτώσεις είναι σημαντικό να προβλεφθούν έτσι ώστε να μπορεί να δοθεί μια έγκαιρη προειδοποίηση για ακραία γεγονότα βροχής και πιθανές πλημμύρες.

Σύμφωνα με την Εικόνα 5.10 για τα γεγονότα μέσης βροχής έχει επιλεγθεί κατώφλι για την πιθανότητα το 0.3, για την έντονη βροχή το 0.2 και για τη σφοδρή βροχή το 0.1 μετά από δοκιμές. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις, εάν έχουμε μια ύφεση η οποία βρίσκεται σε ένα κελί του πλέγματος με την αντίστοιχη ή μεγαλύτερη πιθανότητα στην αντίστοιχη κατηγορία βροχής, τότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η ύφεση αυτή είναι ενεργή και σε επόμενη φάση πρόκειται να προξενήσει το ανάλογο επεισόδιο βροχής, δηλαδή να γίνει επιδρούσα. Ένα παράδειγμα της διαδικασίας αυτής φαίνεται στην Εικόνα 5.11 όπου δεξιά βλέπουμε μια δορυφορική εικόνα METEOSAT πάνω στην οποία εντοπίζεται η ύφεση και έχει σημειωθεί η τροχιά αυτής με πορτοκαλί, αριστερά είναι οι πιθανοτικοί χάρτες για τις τρεις κατηγορίες βροχής και με βάση την τιμή

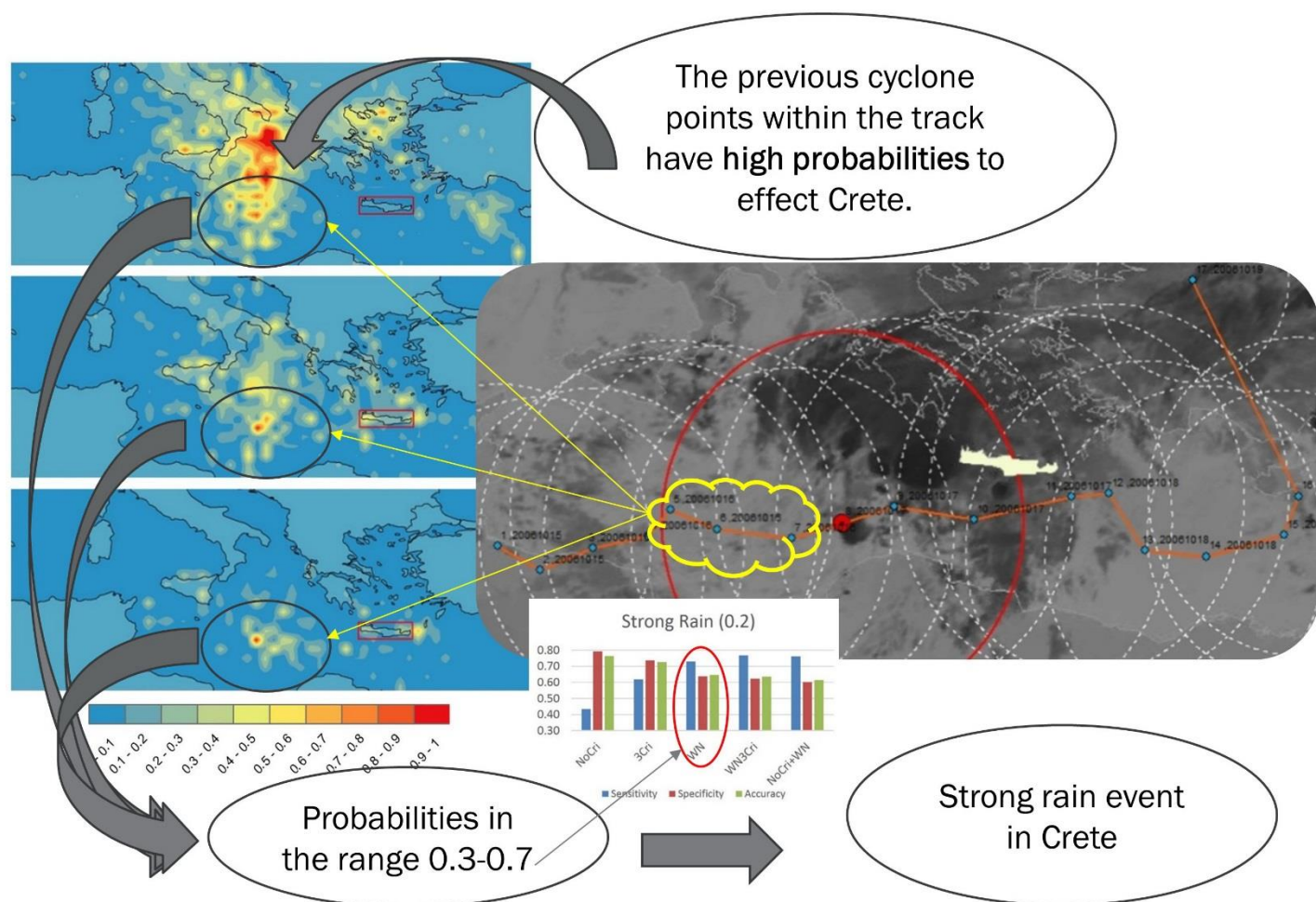
Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα

της πιθανότητας των χαρτών και το κατώφλι που έχει βρεθεί ως βέλτιστο από την αξιολόγηση, δίνεται προειδοποίηση για επικείμενο επεισόδιο βροχής.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα



Εικόνα 5.10: Το αποτέλεσμα της αξιολόγησης (ευαισθησία, ειδικότητα και ακρίβεια) των πιθανοτικών χαρτών (NoCri, 3Cri, WN, WN3Cri, NoCri+WN). Σε παρένθεση στην κορυφή των διαγραμμάτων βρίσκεται η βέλτιστη τιμή κατωφλίου για την οποία βρέθηκαν τα εικονιζόμενα αποτελέσματα.



Εικόνα 5.11: Παράδειγμα χρήσης των πιθανοτικών χαρτών για ένα γεγονός πλημμύρας στις 17/10/2006 στην περιοχή της Αλμυρίδας.

Σύμφωνα με αυτά, παρατηρούμε από την Εικόνα 5.10 ότι για την μέση βροχή ο πιθανοτικός χάρτης NoCri έχει τα καλύτερα αποτελέσματα στην ειδικότητα (0.7) και τα χαμηλότερα στην ευαισθησία (0.56). Αντίθετα ο NoCri+WN έχει τη χαμηλότερη ειδικότητα (<0.6) και τη μεγαλύτερη ευαισθησία η οποία αγγίζει το 0.8. Τα πιο ισορροπημένα αποτελέσματα προκύπτουν από τους πιθανοτικούς χάρτες WN και WN3Cri όπου η ευαισθησία ξεπερνά το 0.7 και η ειδικότητα αγγίζει το 0.65. Η ακρίβεια επίσης σημειώνει καλές επιδόσεις σε αυτή την περίπτωση ξεπερνώντας το 0.65. Στην περίπτωση της έντονης βροχής, οι πιθανοτικοί χάρτες NoCri και 3Cri ευνοούν την ειδικότητα η οποία ξεπερνά το 0.75. Από την άλλη μεριά οι WN και WN3Cri δίνουν καλύτερα αποτελέσματα στην ευαισθησία η οποία εδώ ξεπερνά το 0.7. Σε αυτή την περίπτωση είναι χαμηλότερη η ειδικότητα και η ακρίβεια με τιμές κοντά στο 0.6. Στην περίπτωση της

σφοδρής βροχής όλες οι περιπτώσεις των πιθανοτικών χαρτών είναι πολύ ικανοποιητικές. Ειδικά ο πιθανοτικός χάρτης 3Cri και ο WN3Cri επιτυγχάνουν ευαισθησία κοντά στο 0.8 και ειδικότητα και ακρίβεια της τάξης του 0.7.

Συγκρίνοντας τις αποδόσεις των πιθανοτικών χαρτών, παρατηρούμε ότι ο WN δίνει καλά αποτελέσματα και για τους τρεις στατιστικούς δείκτες και για τις τρεις κατηγορίες βροχής. Ο πιθανοτικός χάρτης NoCri έχει καλύτερα αποτελέσματα στην ευαισθησία και πιο χαμηλά στην ειδικότητα ενώ το αντίθετο συμβαίνει με τον NoCri+WN ο οποίος έχει καλύτερα αποτελέσματα στην ειδικότητα και χαμηλότερα στην ευαισθησία. Στον 3Cri υπάρχει περιθώριο για μεγαλύτερες πιθανότητες με συνέπεια να αυξάνεται η ευαισθησία σε σχέση με τον NoCri και ίδια είναι και η λογική για το ζεύγος WN3Cri και WN.

5.1.7 Αξιολόγηση των πιθανοτικών χαρτών σε γεγονότα πλημμύρας

Εκτός από τις τυχαίες δοκιμές πάνω στις οποίες αξιολογήθηκαν οι πιθανοτικοί χάρτες, δοκιμάστηκαν επίσης και για συγκεκριμένα γεγονότα πλημμύρας τα οποία παρατίθενται στον Πίνακα 5.5, όπου φαίνεται η ημερομηνία της πλημμύρας, η μέγιστη ημερήσια βροχή που καταγράφηκε και ο αριθμός των γεγονότων που καταγράφηκαν στην κάθε κατηγορία βροχής (δηλαδή πόσοι από τους σταθμούς κατέγραψαν γεγονός στα όρια των κατηγοριών βροχής που έχουμε ορίσει). Τα αποτελέσματα για τα γεγονότα πλημμύρας φαίνονται στην Εικόνα 5.12. Στην περίπτωση των πλημμυρικών επεισοδίων, δοκιμάστηκαν στους πιθανοτικούς πίνακες τα κατώφλια που βρέθηκαν από τις τυχαίες δοκιμές (καθολικά κατώφλια στην Εικόνα 5.10) αλλά και τα κατώφλια που βρέθηκαν να δίνουν καλύτερα αποτελέσματα για τις συγκεκριμένες περιπτώσεις. Στα γεγονότα μέσης και σφοδρής βροχόπτωσης τα αποτελέσματα των στατιστικών δεικτών είναι καλύτερα για πιο αυστηρά-υψηλά κατώφλια στις πιθανότητες σε σχέση με αυτά που βρέθηκαν στις τυχαίες δοκιμές. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς οι περιπτώσεις εδώ είναι με τέτοιο τρόπο επιλεγμένες ώστε οι υφέσεις να σχετίζονται με τις περισσότερες κατηγορίες βροχής. Εν αντιθέσει, όταν οι υφέσεις χωρίζονται τυχαία, όπως περιεγράφηκε στο κεφάλαιο 3, τα γεγονότα βροχής είναι λιγότερα και για να τα προσομοιώσει το μοντέλο θέλει πιο ‘χαλαρούς’ περιορισμούς στα κατώφλια των πιθανοτήτων. Στην περίπτωση των γεγονότων πλημμύρας, τα χαμηλά καθολικά κατώφλια όπως προέκυψαν στη γενική αξιολόγηση του μοντέλου δίνουν όπως είναι αναμενόμενο πολύ υψηλές τιμές ευαισθησίας ξεπερνώντας το 0.8. Όμως, δεν πετυχαίνουν αντίστοιχα καλές

τιμές στην ειδικότητα η οποία προσεγγίζει το 0.6. Μόνο στην περίπτωση της έντονης βροχής το κατώφλι στην πιθανότητα βρέθηκε να είναι ίδιο με το καθολικό.

Αναλυτικότερα, για την μέση βροχή με το καθολικό κατώφλι της πιθανότητας η ευαισθησία φτάνει το 0.8 με τον πιθανοτικό χάρτη 3C_{ri} και η ειδικότητα το 0.5. Αυξάνοντας το κατώφλι της πιθανότητας στο 0.5 η ευαισθησία μειώνεται στο 0.7 και παράλληλα ανεβαίνει η ειδικότητα στο 0.8. Για τα γεγονότα έντονης βροχής τα αποτελέσματα είναι πολύ ικανοποιητικά με όλους τους πιθανοτικούς χάρτες. Για τους πιθανοτικούς χάρτες NoC_{ri}, 3C_{ri} και WN επιτυγχάνεται η βέλτιστη ισορροπία για τα τρία στατιστικά μέτρα που εξετάζονται. Η ευαισθησία σε αυτή την περίπτωση φτάνει και ξεπερνά το 0.8 και η ειδικότητα κυμαίνεται μεταξύ 0.6 και 0.8. Τέλος, πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα επιτυγχάνονται και στα γεγονότα σφοδρής βροχής ως προς την ευαισθησία, η οποία ξεπερνά το 0.8 και για τα δύο κατώφλια πιθανότητας (0.1 και 0.2). Για το καθολικό κατώφλι (0.1), η ειδικότητα κυμαίνεται μεταξύ 0.5 και 0.6, ενώ για το βαθμονομημένο κατώφλι (0.2) διαμορφώνεται στο 0.8.

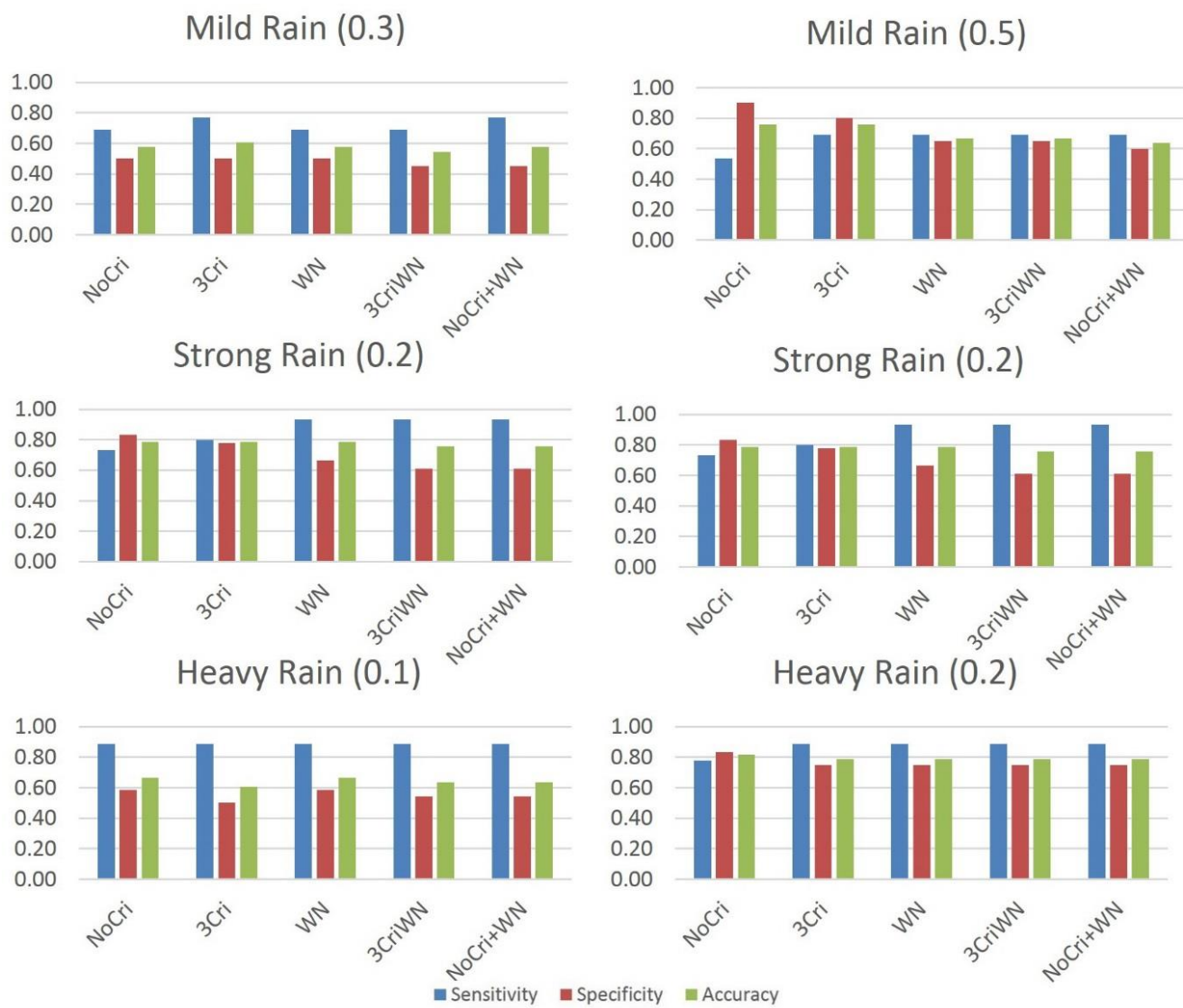
Συνολικά, τα καθολικά κατώφλια της πιθανότητας δίνουν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την ευαισθησία ενώ τα βαθμονομημένα κατώφλια βελτιώνουν την εξειδίκευση κρατώντας σε υψηλά επίπεδα και την ευαισθησία. Επίσης, ο πιθανοτικός χάρτης WN σε κάθε περίπτωση, δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα κάτι το οποίο αντικατοπτρίζεται στα στατιστικά μέτρα. Σε γενικές γραμμές, ο NoC_{ri} είναι η πιο αυστηρός πιθανοτικός χάρτης δίνοντας χαμηλότερη ευαισθησία και υψηλότερη ειδικότητα και ο NoC_{ri} + WN δίνει υψηλότερη ευαισθησία και χαμηλότερες τιμές στην ειδικότητα. Οι υπόλοιποι πιθανοτικοί χάρτες δίνουν αποτελέσματα ενδιάμεσα των παραπάνω.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα

Πίνακας 5.5: Περιπτώσεις βροχής που οδήγησαν σε πλημμύρα πάνω στις οποίες αξιολογήθηκαν οι πίνακες πιθανοτήτων.

<i>Ημερομηνία</i>	<i>Μέγιστη ημερήσια βροχή (mm/day)</i>	<i>Μέση Βροχή (#σταθμών)</i>	<i>Έντονη Βροχή (#σταθμών)</i>	<i>Σφοδρή Βροχή (#σταθμών)</i>
19940113	206	9	3	3
19940114	197.2	11	22	12
19970112	89	15	2	
19970114	165.5	10	1	2
19991207	29.5	3		
19991208	43.5	13		
20000115	280	23	4	2
20000116	170	23	11	3
20000421	73.3	6	2	
20001205	270	15	3	1
20001206	72	21	6	
20001207	96.1	22	14	
20010115	140	6	1	1
20010116	160	11	1	5
20020909	48.5	5		
20021013	52.7	19	1	
20021014	87.3	29	10	
20030125	24.9	5		
20030126	78	15	1	
20030127	370	35	12	3
20030529	160	5	1	1
20030530	130	21	8	3
20041105	30	5		
20041106	86	5	2	
20050526	64	25	2	
20061011	71.5	32	3	
20061012	72.4	17	4	
20061017	200	17	7	1
20061018	223.5	21	12	9

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα



Εικόνα 5.12: Αξιολόγηση πιθανοτικών χαρτών πάνω στα γεγονότα πλημμύρας που συνοψίζονται στον Πίνακα 5.5.

5.2 Κεραυνοί και βροχή

5.2.1 Χωροχρονική ομαδοποίηση κεραυνών

Οι χωροχρονικές ομάδες για την περίοδο ανάλυσης υπολογίστηκαν με χρήση του αλγορίθμου G-means και k-means. Στην Εικόνα 5.13 φαίνεται μια περίπτωση καταιγίδας στις 16/11/2012 με καταγεγραμμένη όλη την πορεία των κεραυνών, οι οποίοι ξεκινούν δυτικά της Κρήτης και νότια της Ιταλίας και ακολουθούν πορεία ανατολική προς την Κρήτη, όπου προσεγγίζοντάς την εμφανίζονται γεγονότα βροχής σε πλήθος σταθμών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, προκύπτει ότι η εμφάνιση των κεραυνών γύρω από την περιοχή μελέτης συσχετίζεται με φαινόμενα βροχής. Επίσης, η ακολουθία των κεραυνών δεν είναι τυχαία αλλά διέπεται από μορφολογία τέτοια ώστε να επιτρέπεται η ομαδοποίηση τους στο χώρο και το χρόνο. Ένα παράδειγμα των ομάδων κεραυνών φαίνεται στην Εικόνα 5.14. Οι διαφορετικές ομάδες συμβολίζονται με διαφορετικό χρώμα, το κέντρο τους επισημαίνεται με ένα σύμβολο x και οι σταθμοί μέτρησης στο νησί της Κρήτης συμβολίζονται με σταυρό. Το συγκεκριμένο παράδειγμα λαμβάνει χώρα σε διάστημα 6 ωρών (12-18 UTC) και αποτελεί κομμάτι μιας ισχυρής βροχόπτωσης στις 16/10/2012 που επηρέασε κυρίως τη Δυτική Κρήτη. Εβδομήντα ομάδες κεραυνών έχουν εντοπιστεί κατά το γεγονός αυτό με μέση διάρκεια 5.2 ώρες, μέση επιφάνεια 497 km² και μέσο αριθμό κεραυνών μεγαλύτερο του 100.

Αν εστιάσουμε στην πληγείσα περιοχή παρατηρείται ότι τα κέντρα των ομάδων είναι πολύ κοντά στους σταθμούς που καταγράφουν τη μεγαλύτερη βροχή και η χρονική σφραγίδα αυτών των ομάδων είναι κοντά χρονικά στο χρόνο που σημειώθηκαν οι βροχοπτώσεις σε τρεις ενδεικτικούς βροχομετρικούς σταθμούς (Χανίων, Χανιά Κέντρο και Βρυσών).

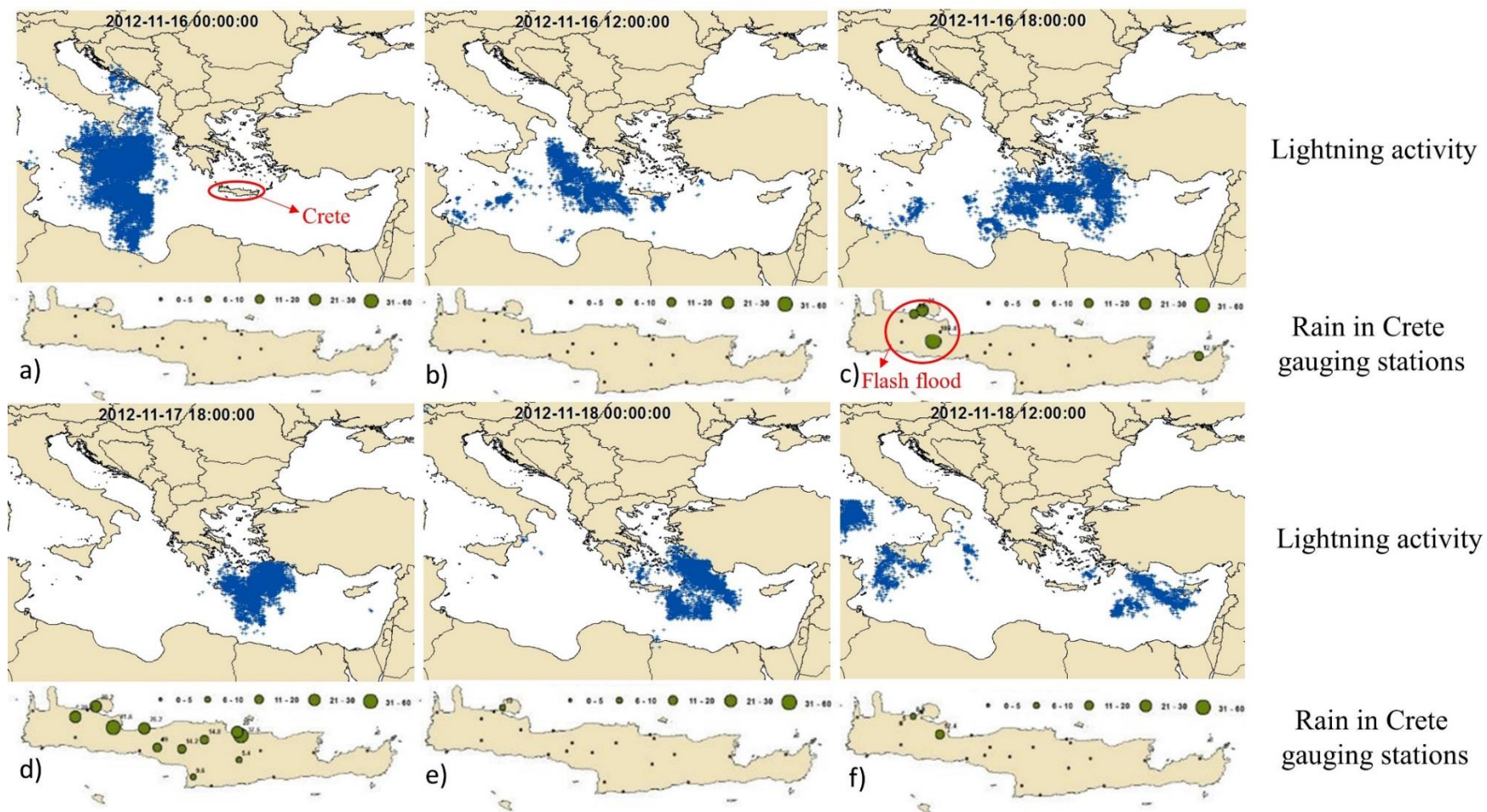
Η αθροιστική κατανομή των γενικών χαρακτηριστικών των ομάδων κεραυνών που βρέθηκαν παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.15 για ακτίνα εντοπισμού 50 km. Ο οριζόντιος άξονας αφορά τον αριθμό των ομάδων (πόσες ομάδες) από το 5ο μέχρι το 95 εκατοστημόριο και ο κάθετος άξονας αφορά τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των ομάδων (αριθμός κεραυνών, περιοχή κάλυψης και χρονική διάρκεια ομάδας) για περίπου 4.000 ομάδες αστραπών, για την περίοδο ανάλυσης. Η πρώτη στήλη του σχήματος δείχνει την αθροιστική κατανομή των χαρακτηριστικών των ομάδων, ενώ η δεύτερη στήλη αφορά τις διαφορές των συστάδων που σχετίζονται με μη μηδενικές βροχοπτώσεις σε σχέση με εκείνες που σχετίζονται με βροχή υψηλότερη από το 99^ο εκατοστημόριο (βροχή υψηλότερη από 10.6 mm/h), δηλαδή ισχυρή βροχόπτωση. Ο αριθμός των

κεραυνών, η περιοχή κάλυψης και η χρονική διάρκεια των ομάδων εξετάζονται για όλες τις ενεργές ομάδες κεραυνών οι οποίες σχετίζονται με μη μηδενικές βροχοπτώσεις και ειδικά για εκείνες που σχετίζονται με τουλάχιστον μία περίπτωση ωριαίας βροχόπτωσης υψηλότερης από 5 mm/h ή 10.6 mm/h (δηλαδή βροχόπτωση μεγαλύτερη του μέσου 95^{ου} και του 99^{ου} εκατοστημρίου της ωριαίας βροχής για όλους τους σταθμούς μέτρησης).

Προϋπόθεση για να θεωρηθεί ότι μια ομάδα κεραυνών σχετίζεται με καταγεγραμμένη σε κάποιον βροχομετρικό σταθμό βροχή είναι ο σταθμός μέτρησης να βρίσκεται ‘κοντά’ στο κέντρο της, δηλαδή ο σταθμός μέτρησης να βρίσκεται εντός της περιοχής αναζήτησης σύμφωνα με την ακτίνα εντοπισμού που διερευνάται (50 km σε αυτή την περίπτωση). Επίσης, η χρονική σφραγίδα της καταγεγραμμένης βροχής θα πρέπει να είναι εντός της χρονικής διάρκειας της ομάδας, η οποία ορίζεται από τον πρώτο και τον τελευταίο καταγεγραμμένο κεραυνό της. Φυσικά, περισσότερες από μία ομάδες κεραυνών μπορεί να σχετίζονται με ένα συμβάν βροχής σύμφωνα με την απόσταση και το κριτήριο του χρόνου που περιγράφηκαν προηγουμένως.

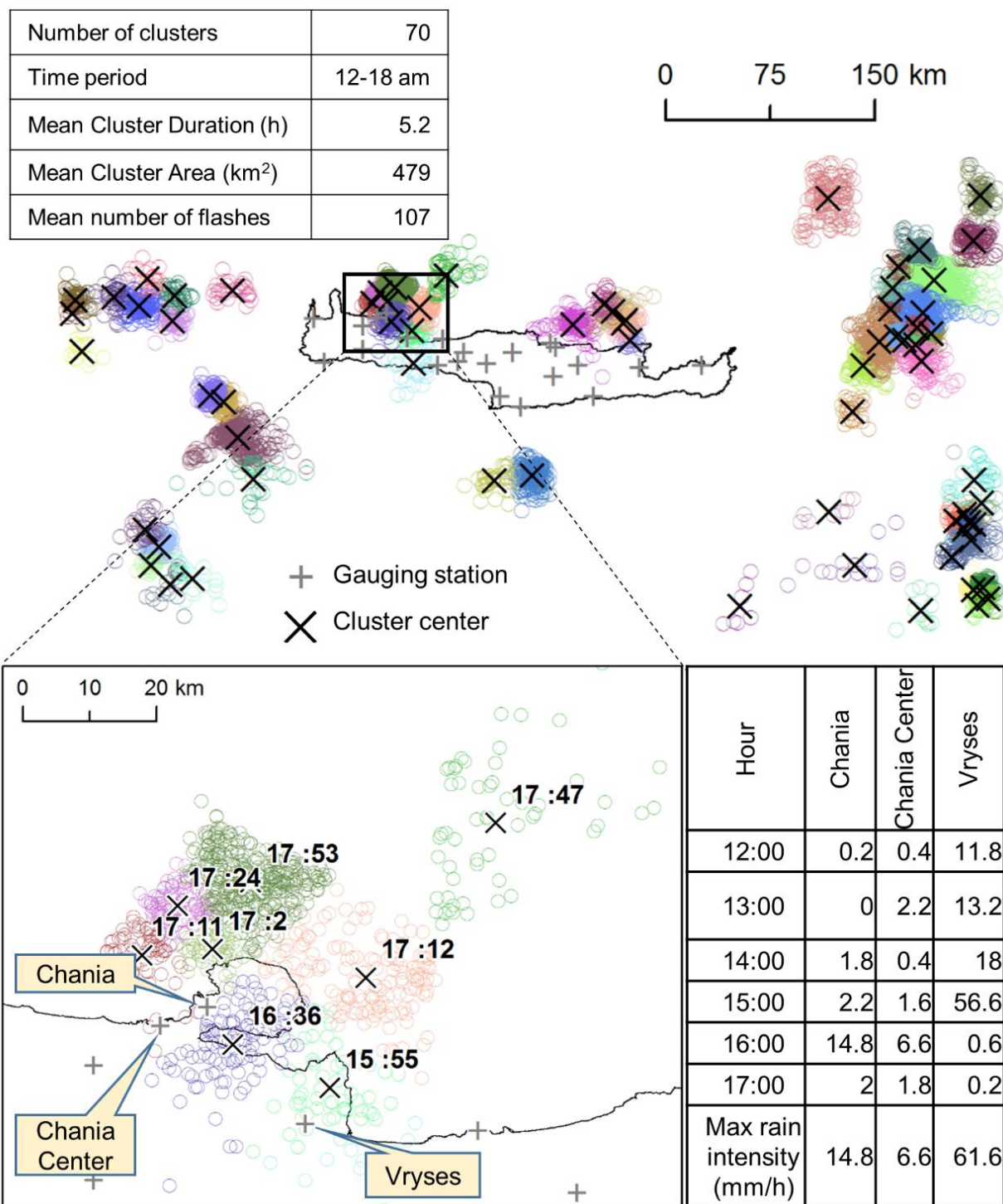
Σύμφωνα με τη Εικόνα 5.15, οι ομάδες που σχετίζονται με ισχυρή βροχόπτωση έχουν μεγαλύτερο αριθμό κεραυνών και καλύπτουν μεγαλύτερη επιφάνεια κάτι το οποίο γίνεται πιο εμφανές για τις ομάδες άνω του 50^{ου} εκατοστημρίου. Οι διαφορές μεταξύ της διάρκειας των ομάδων για τις διαφορετικές περιπτώσεις βροχής δεν είναι ιδιαίτερα εμφανείς. Σε αυτή την περίπτωση, η πλειοψηφία των ομάδων που συνδέονται με γεγονότα υψηλής βροχής διαρκεί λιγότερο από ό,τι εκείνες που αφορούν όλες τις βροχοπτώσεις. Η μέση τετραγωνική απόκλιση (MTA) υπολογίστηκε για τα τρία χαρακτηριστικά της ανάλυσης των ομάδων δίνοντας $MTA_f \approx 22$ κεραυνούς, $MTA_a \approx 585 \text{ km}^2$ και $MTA_d \approx 45 \text{ min}$ για τον αριθμό των κεραυνών, την περιοχή κάλυψης και τη διάρκεια των ομάδων, αντιστοίχως. Γενικά οι ομάδες που σχετίζονται με συμβάντα ισχυρής βροχόπτωσης είναι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων μικρότερες χρονικά (διαρκούν λιγότερο χρόνο), μεγαλύτερες σε επιφάνεια και με περισσότερους κεραυνούς.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα



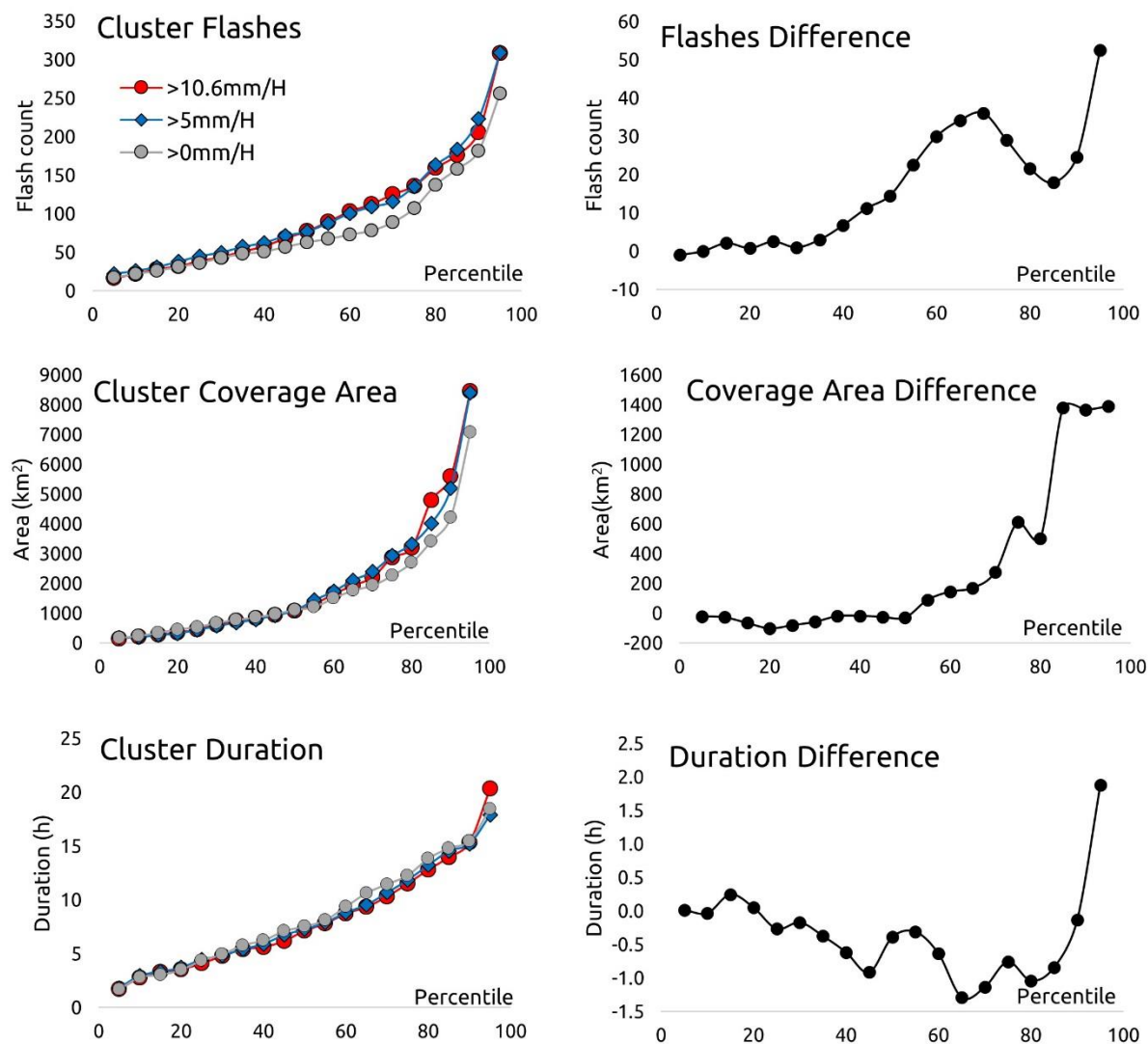
Εικόνα 5.13: Παράδειγμα της πορείας μια τυπικής καταιγίδας στις 16/11/2012. Οι κεραυνοί σε κάθε εικόνα αφορούν χρονικό διάστημα 6 ωρών και αντίστοιχα η βροχή για κάθε σταθμό έχει αθροιστεί για 6 ώρες.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα



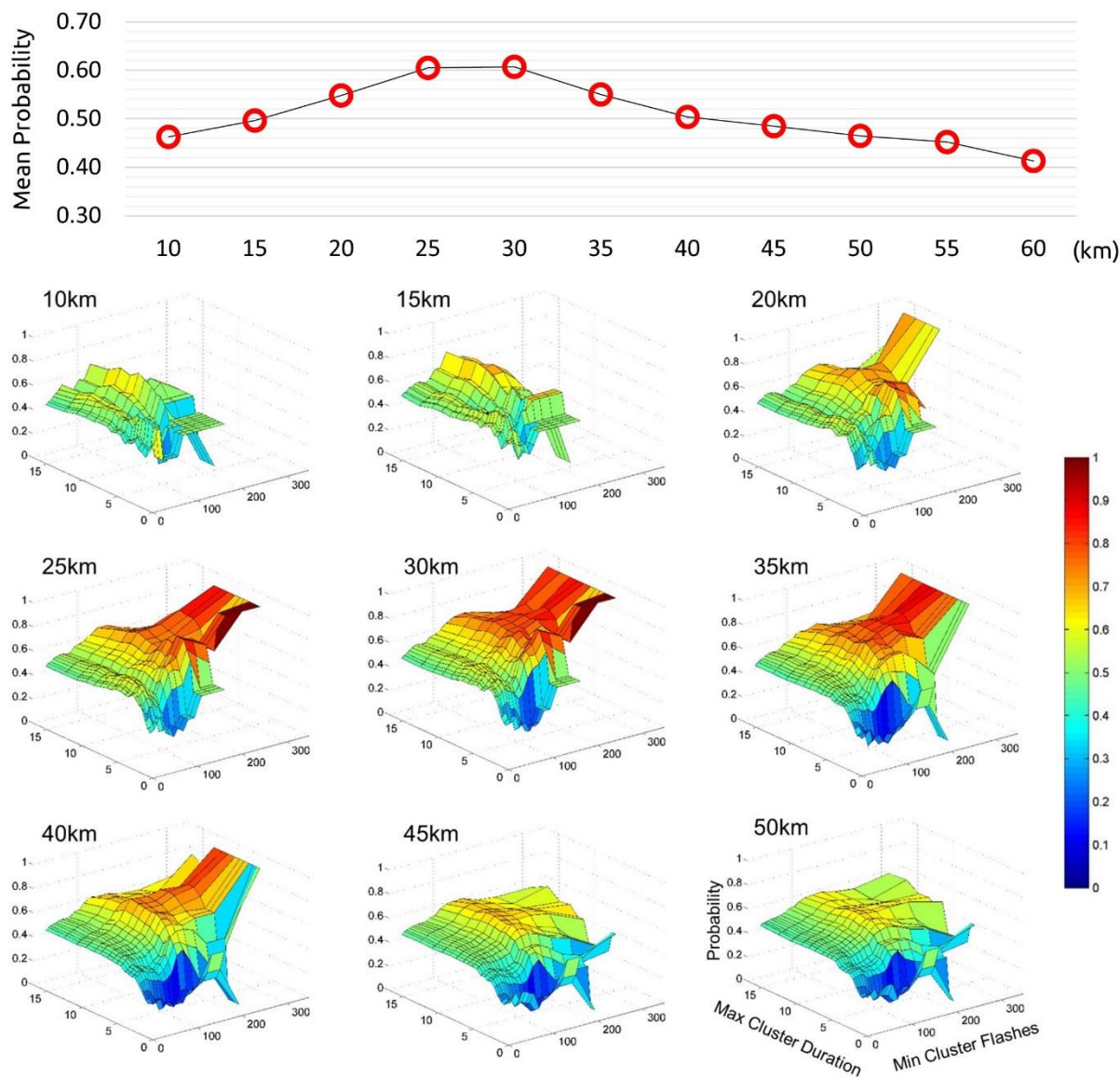
Εικόνα 5.14: Παράδειγμα χωροχρονικής ομαδοποίησης των κεραυνών για ένα γεγονός ισχυρής βροχής στις 16/11/2012.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα



Εικόνα 5.15: Τα χαρακτηριστικά των ομάδων κεραυνών. Στην αριστερή στήλη οι αθροιστικές κατανομές για ομάδες που συνδέονται με γεγονότα βροχής άνω των 10.6 mm/h, 5 mm/h και 0 mm/h και στη δεξιά στήλη η διαφορά των ομάδων στα επιμέρους χαρακτηριστικά.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα



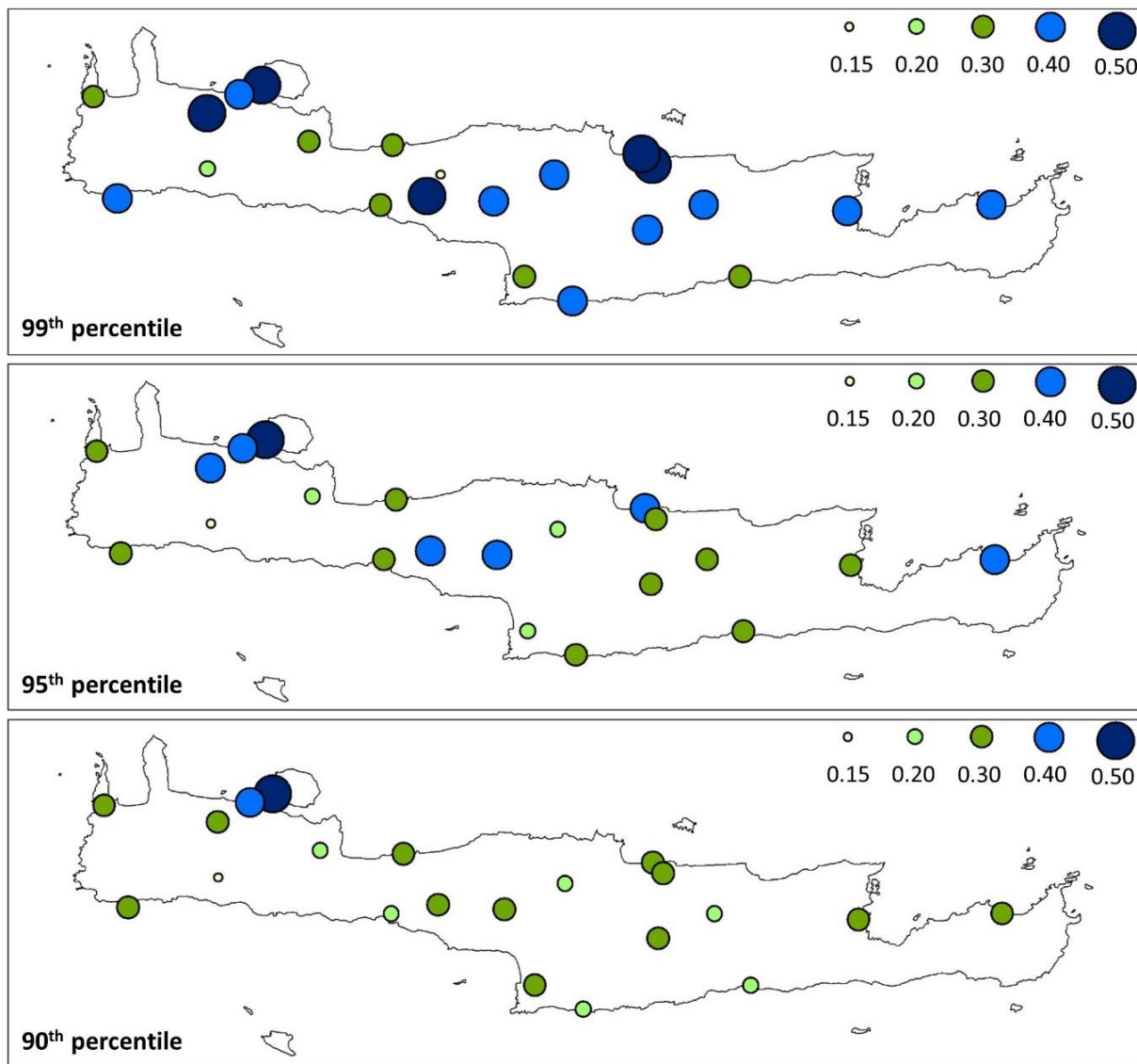
Εικόνα 5.16: Η πιθανότητα μια ομάδα κεραυνών να συμπίπτει με υψηλή ωριαία βροχόπτωση μεγαλύτερη των 5mm/h (95^ο εκατοστημόριο), ανάλογα με τη διάρκεια της και τον αριθμό των κεραυνών.

Η πιθανότητα της σύμπτωσης μιας ομάδας κεραυνών με συγκεκριμένη διάρκεια και αριθμό κεραυνών με ωριαία εκδήλωση βροχής υψηλότερης του 95^{ου} εκατοστημορίου (>5 mm/h) παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.16. Όσον αφορά τα τριών διαστάσεων γραφήματα στην Εικόνα 5.16, οι δύο οριζόντιοι άξονες αφορούν τα εκατοστημόρια 10 με 95 του αριθμού των κεραυνών και της χρονικής διάρκειας των ομάδων κεραυνών. Πιο συγκεκριμένα, ο άξονας για τη διάρκεια της ομάδας αφορά τις ομάδες που έχουν διάρκεια μικρότερη ή ίση με τις τιμές των ετικετών και ο

άξονας για τον αριθμό των κεραυνών αφορά τις ομάδες των οποίων ο αριθμός των κεραυνών υπερβαίνει τις αντίστοιχες τιμές των ετικετών. Η ανάλυση εφαρμόζεται για διαφορετικές ακτίνες εντοπισμού (10-50 km). Σχετικά με την μέση πιθανότητα, η οποία υπολογίζεται πάνω στη διάρκεια της ομάδας και του αριθμού των κεραυνών, αυτή παρουσιάζεται στην κορυφή της Εικόνα 5.16. Σύμφωνα με τη μέση πιθανότητα προκύπτει ότι στα 25- 30 km είναι η βέλτιστη ακτίνα εντοπισμού, μέσα στην οποία ανιχνεύονται οι περισσότερες βροχοπτώσεις πάνω από 5 mm/h (95° εκατοστημόριο των ωριαίων βροχοπτώσεων). Αυτό είναι σε συμφωνία με τους Soula and Chauzy, (2001) που βρίσκουν επίσης με τη μέθοδο της κανάβου τα 30km να είναι η βέλτιστη ανάλυση. Επίσης, στην Εικόνα 5.16, σύμφωνα με τα λεπτομερή διαγράμματα για κάθε ακτίνα εντοπισμού, φαίνεται ότι μεγαλύτερη πιθανότητα σύμπτωσης παρατηρείται για ομάδες που έχουν περισσότερους κεραυνούς και μικρότερη διάρκεια. Για παράδειγμα, η πιθανότητα για ακτίνα εντοπισμού 30 km είναι μεγαλύτερη από 0.6, όταν η ομάδα έχει πάνω από 150 κεραυνούς.

5.2.2 Σχέση κεραυνών και βροχόπτωσης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας, όπου η κεραυνική δραστηριότητα αναζητείται σε μια περιοχή γύρω από το βροχομετρικό σταθμό σύμφωνα με την επιλεγμένη ακτίνα εντοπισμού. Στην Εικόνα 5.17 φαίνεται η μέση πιθανότητα σύμπτωσης της ωριαίας βροχόπτωσης για το 99°, 95° και 90° εκατοστημόριο (υψηλή ωριαία βροχόπτωση) όταν υπάρχουν κεραυνοί (περισσότεροι του ενός κεραυνοί στην περιοχή αναζήτησης). Η μέση πιθανότητα υπολογίζεται ως μέσος όρος επί όλων των χρονικών υστερήσεων (0-60min) και παραθύρων (10-60min) και πάνω από όλες τις ακτίνες εντοπισμού (10-100km), για κάθε σταθμό μέτρησης. Οι έγχρωμες φυσαλίδες σε κάθε γράφημα αντιστοιχούν στην πιθανότητα η οποία είναι μικρότερη ή ίση με την αντίστοιχη τιμή και υψηλότερη από την τιμή της προηγούμενης κατηγορίας. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό προκύπτει ότι η ωριαία βροχή πάνω από το 99° εκατοστημόριο είναι πιο πιθανό να σχετίζεται με την κεραυνική δραστηριότητα στην ευρύτερη περιοχή σε σύγκριση με γεγονότα ωριαίας βροχής χαμηλότερης έντασης. Επίσης, οι σταθμοί που βρίσκονται στην βόρεια ακτή σχετίζονται περισσότερο με την κεραυνική δραστηριότητα. Επιπλέον, οι βροχομετρικοί σταθμοί της δυτικής ακτής έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να σχετίζονται με την κεραυνική δραστηριότητα σε σύγκριση με τους άλλους.



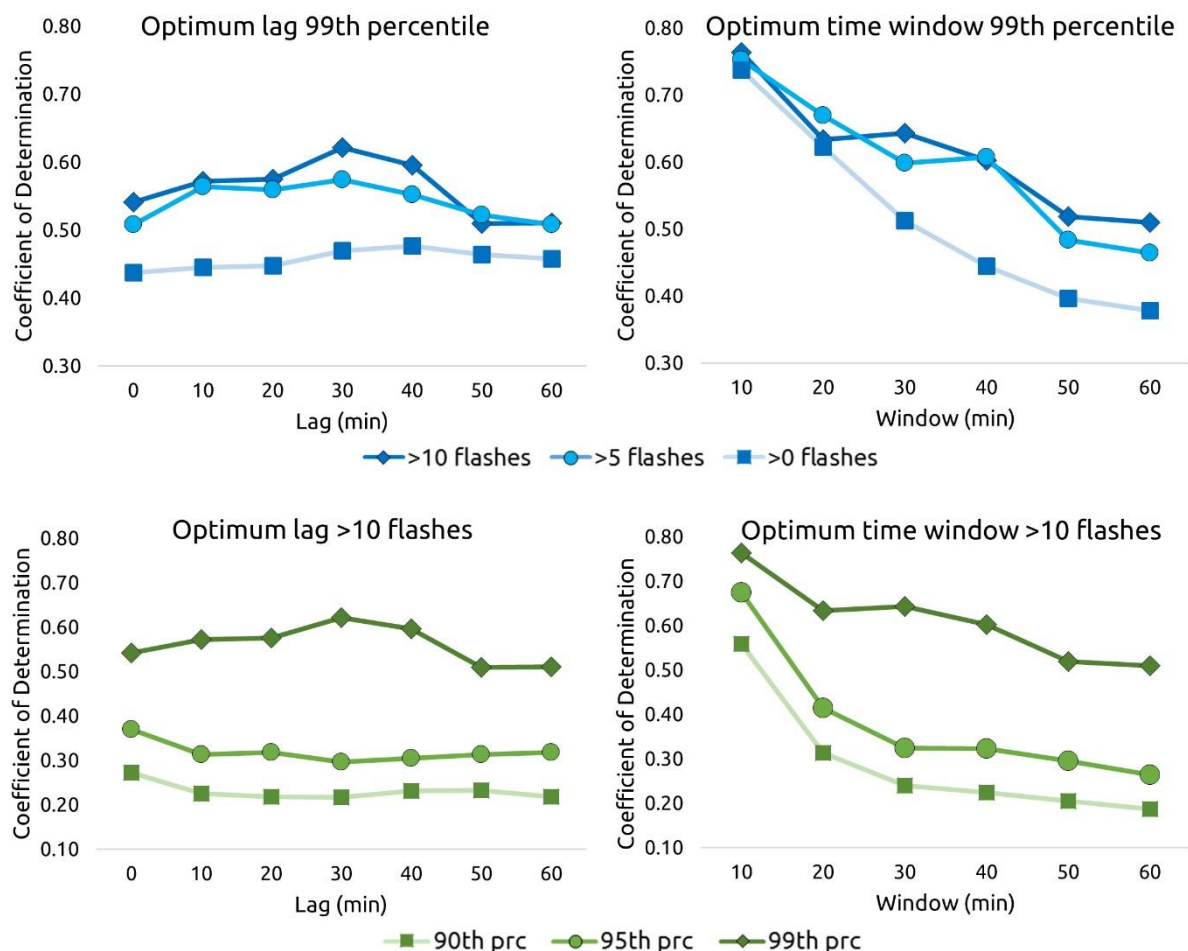
Εικόνα 5.17: Η μέση πιθανότητα σύμπτωσης γεγονότων ωριαίας βροχόπτωσης 99^{ου}, 95^{ου} και 90^{ου} εκατοστημορίου με κεραυνική δραστηριότητα.

5.2.3 Μέση συσχέτιση βροχής-κεραυνών

Η μέση τιμή του συντελεστή προσδιορισμού χρησιμοποιώντας δεδομένα από όλους τους βροχομετρικούς σταθμούς και για όλες τις ακτίνες εντοπισμού, για διαφορετικές χρονικές υστερήσεις και παράθυρα παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.18. Στην αριστερή στήλη του σχήματος ο μέσος όρος έχει υπολογιστεί πάνω σε όλες τις χρονικές υστερήσεις, ενώ στη δεξιά στήλη ο μέσος όρος υπολογίζεται σε διαφορετικά χρονικά παράθυρα.

Στην πρώτη σειρά φαίνεται ο συντελεστής προσδιορισμού για εκδηλώσεις βροχής μεγαλύτερες ή ίσες του 99^{ου} εκατοστημορίου και διαφορετικό αριθμό κεραυνών στην περιοχή αναζήτησης. Σε αυτή την περίπτωση, ο συντελεστής προσδιορισμού είναι ισχυρότερος όταν οι κεραυνοί στη γύρω περιοχή είναι άνω των 10 και για τις δύο περιπτώσεις των διαφορετικών χρονικών παραθύρων και υστερήσεων. Η διαφορά του συντελεστή προσδιορισμού όταν υπάρχουν περισσότεροι από 10 ή 5 κεραυνοί σε σύγκριση με όταν υπάρχει τουλάχιστον ένας είναι σημαντική. Επίσης, ο συντελεστής προσδιορισμού φτάνει το 0.75 (ισχυρή συσχέτιση) για χρονικό παράθυρο 10 λεπτών σε σύγκριση με τα μεγαλύτερα παράθυρα του χρόνου, όπου είναι πολύ χαμηλότερη (μέτρια συσχέτιση μεταξύ 0.4-0.6). Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς όσο μικρότερο είναι το χρονικό διάστημα της ανάλυσης τόσο πιο ομοιογενή είναι τα δεδομένα. Για παράδειγμα, η βροχή σε μικρό χρονικό παράθυρο αναμένεται να έχει λιγότερες μεταβολές. Γενικά, στις περισσότερες περιπτώσεις των διαφορετικών χρονικών παραθύρων και χρονικών υστερήσεων ανάλυσης ο συντελεστής προσδιορισμού κυμαίνεται μεταξύ 0.4-0.6 (μέτρια συσχέτιση).

Στη δεύτερη σειρά της Εικόνα 5.18, δεδομένου ότι έχουμε περισσότερους από 10 κεραυνούς, υπολογίζεται ο μέσος συντελεστής προσδιορισμού για διαφορετικές συσσωρεύσεις βροχής. Όπως φαίνεται, ο συντελεστής προσδιορισμού είναι μεγαλύτερος για μεγαλύτερες συσσωρεύσεις βροχής. Η διαφορά μεταξύ του 99ου εκατοστημορίου βροχής και των λοιπών εκατοστημορίων βροχής είναι σημαντική. Λιγότερο σημαντική είναι η διαφορά μεταξύ του 95^{ου} και 90^{ου} εκατοστημορίου βροχής. Πιο συγκεκριμένα, για τα γεγονότα βροχής του 99^{ου} εκατοστημορίου ο συντελεστής προσδιορισμού είναι μέτριος (0.4-0.6), ενώ στις δύο άλλες περιπτώσεις είναι αδύναμος (0.1-0.3).



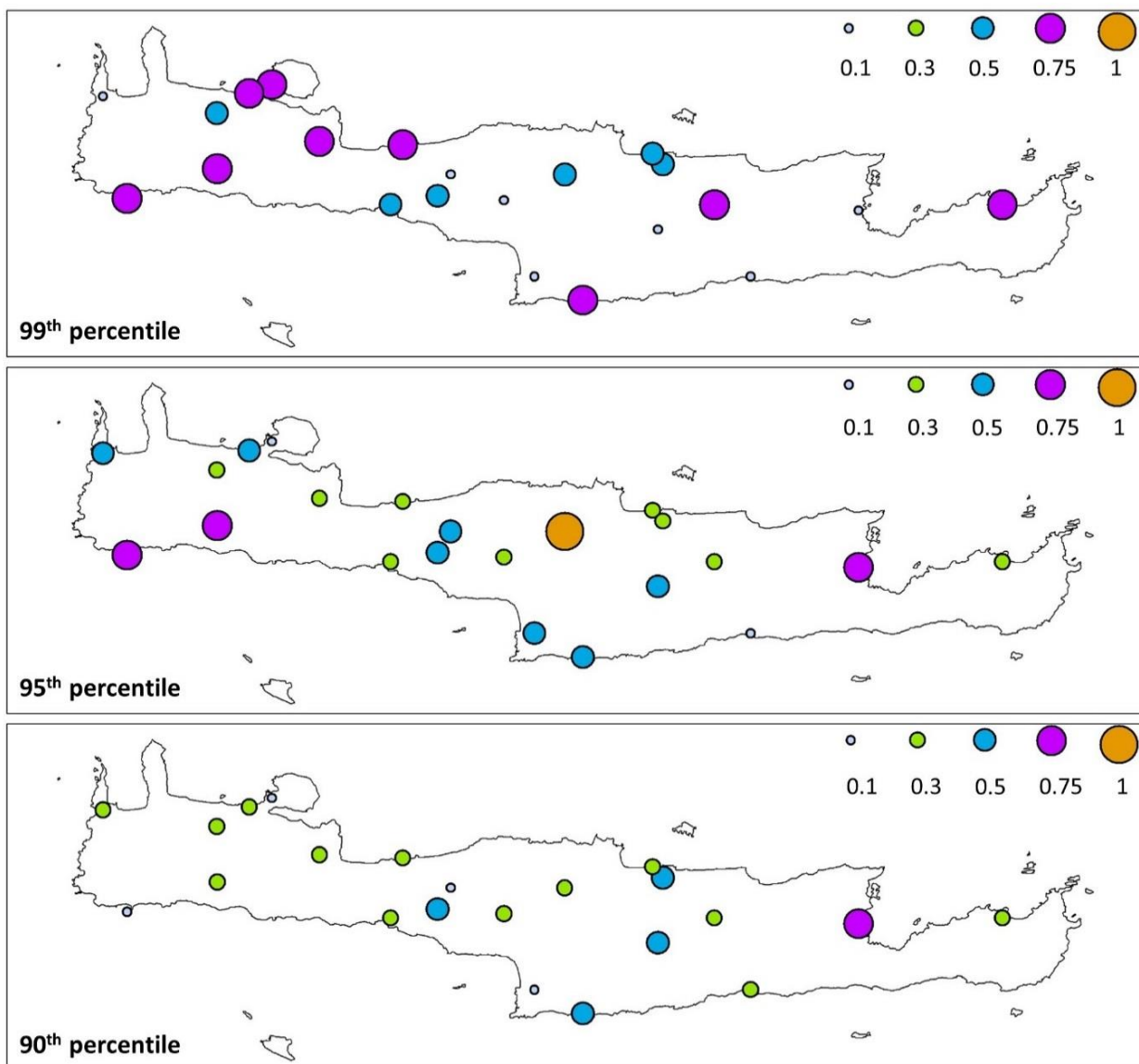
Εικόνα 5.18: Ο μέσος συντελεστής προσδιορισμού για διαφορετικές χρονικές υστερήσεις και παράθυρα για α) το 99^ο εκατοστημόριο της βροχής και διαφορετικό αριθμό κεραυνών, β) για πάνω από 10 κεραυνούς και διαφορετικά εκατοστημόρια βροχής.

5.2.4 Μέση συσχέτιση βροχής-κεραυνών ανά σταθμό

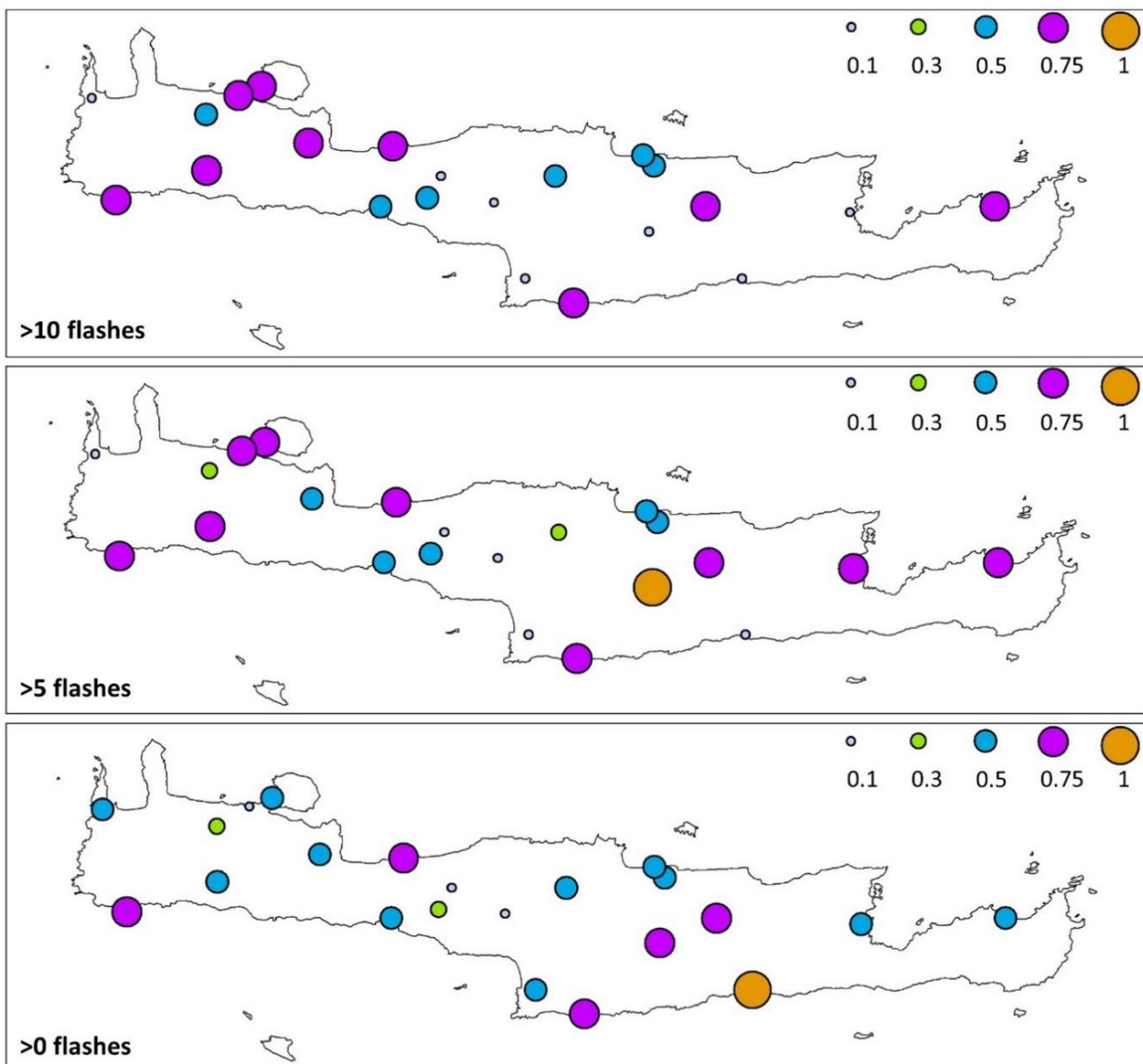
Εκτός από τη γενική επισκόπηση του μέσου συντελεστή προσδιορισμού σε όλους τους σταθμούς, εξετάζεται επίσης ο συντελεστής προσδιορισμού για τους διαφορετικούς σταθμούς έτσι ώστε να διερευνηθεί και χωρικά η συσχέτιση μεταξύ βροχής και κεραυνών. Στην Εικόνα 5.19 υπολογίζεται η μέση τιμή του συντελεστή προσδιορισμού για κάθε βροχομετρικό σταθμό για το 99^ο, 95^ο και 90^ο εκατοστημόριο της βροχής. Ο μέσος συντελεστής προσδιορισμού υπολογίζεται επί όλων των χρονικών υστερήσεων (0-60 min) και παραθύρων (10-60 min) και για όλες τις ακτίνες εντοπισμού (10-100 km) για κάθε βροχομετρικό σταθμό, όταν υπάρχουν πάνω από 10 κεραυνοί στην ευρύτερη

περιοχή. Επισημαίνεται ότι έχουν ληφθεί υπόψιν μόνο οι στατιστικά σημαντικοί (για 90% επίπεδο εμπιστοσύνης) συντελεστές προσδιορισμού, οι οποίοι συμμετέχουν στον υπολογισμό του μέσου συντελεστή προσδιορισμού. Ο μέσος συντελεστής προσδιορισμού είναι υψηλότερος για γεγονότα βροχής μεγαλύτερης έντασης (99^ο εκατοστημόριο). Σχεδόν για τους μισούς βροχομετρικούς σταθμούς ο συντελεστής προσδιορισμού υπερβαίνει το 0.5 σε αυτή την περίπτωση. Για το 95^ο εκατοστημόριο της βροχής οι μισοί από τους σταθμούς έχουν συντελεστή προσδιορισμού που ξεπερνά το 0.3. Αντίθετα, μόλις 5 από τους 22 βροχομετρικούς σταθμούς έχουν συντελεστή προσδιορισμού μεγαλύτερο του 0.3 για το 90^ο εκατοστημόριο της βροχής. Χωρικά, στη δυτική πλευρά του νησιού φαίνεται να υπάρχει μεγαλύτερη συσχέτιση μεταξύ βροχής και κεραυνών με το συντελεστή προσδιορισμού να ξεπερνά το 0.5 ειδικά για το 99^ο εκατοστημόριο της βροχής. Επίσης, σε πολλούς δυτικούς βροχομετρικούς σταθμούς ο συντελεστής προσδιορισμού είναι ισχυρός ξεπερνώντας το 0.75 για το 99^ο και 95^ο εκατοστημόριο της βροχής.

Στην Εικόνα 5.20 υπολογίζεται ο μέσος συντελεστής προσδιορισμού για κάθε βροχομετρικό σταθμό για περισσότερους από 0, 5 και 10 κεραυνούς στην ευρύτερη περιοχή του κάθε σταθμού. Ο μέσος συντελεστής προσδιορισμού υπολογίζεται επί όλων των χρονικών υστερήσεων (0-60min) και παραθύρων (10-60min) και πάνω από σε όλες τις ακτίνες εντοπισμού (10-100 km), για κάθε βροχομετρικό σταθμό, για το 99^ο εκατοστημόριο της βροχής. Για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις κεραυνών, περισσότεροι από τους μισούς βροχομετρικούς σταθμούς έχουν συντελεστή προσδιορισμού υψηλότερο από 0.5. Ο συντελεστής προσδιορισμού γενικά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.20 είναι υψηλότερος όταν υπάρχουν περισσότεροι κεραυνοί στην ευρύτερη περιοχή (περισσότεροι από 10 ή 5 κεραυνοί στην περιοχή αναζήτησης). Σε αυτή την περίπτωση, ο συντελεστής προσδιορισμού είναι υψηλότερος στη δυτική πλευρά του νησιού. Συγκρίνοντας την περίπτωση στην Εικόνα 5.19, όπου έχουμε διαφορετικά κατώφλια βροχής αλλά σταθερό αριθμό κεραυνών, και την Εικόνα 5.20, όπου αλλάζουν τα κατώφλια των κεραυνών αλλά έχουμε σταθερή (υψηλή) βροχή, παρατηρούμε ότι η χαμηλότερη βροχή επηρεάζει περισσότερο τον συντελεστή συσχέτισης (μικρότερος όταν έχουμε χαμηλές τιμές βροχής) σε σχέση με όταν έχουμε χαμηλότερο αριθμό κεραυνών. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι η πλειοψηφία των βροχομετρικών σταθμών στην Εικόνα 5.20 έχουν τιμές άνω του 0.3 με πολλούς από αυτούς να ξεπερνούν και το 0.5. Αντίθετα στην Εικόνα 5.19 μόλις για πέντε βροχομετρικούς σταθμούς η συσχέτιση ξεπερνά το 0.3 στο 90^ο εκατοστημόριο της βροχής.



Εικόνα 5.19: Ο μέσος συντελεστής προσδιορισμού για το 90^ο, 95^ο και 99^ο εκατοστημόριο της βροχής δεδομένου ότι υπάρχουν άνω των 10 κεραυνοί.



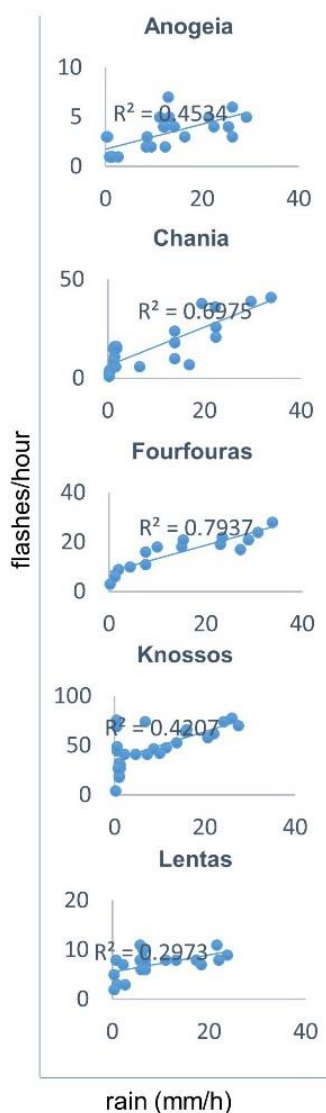
Εικόνα 5.20: Ο μέσος συντελεστής προσδιορισμού για περισσότερους από 0, 5 και 10 κεραυνούς για το 99^ο εκατοστημόριο της βροχής.

5.2.5 Μελέτη περιπτώσεων έντονης βροχής

Εκτός από τα παραπάνω, τα οποία αφορούν όλα τα ζεύγη βροχής-κεραυνών που πληρούν τα αντίστοιχα κατώφλια στην συσσώρευση της βροχής και στον αριθμό των κεραυνών, εξετάστηκε και η περίπτωση μέγιστης ωριαίας βροχόπτωσης για κάθε σταθμό. Στην Εικόνα 5.21 παραθέτουμε τις περιπτώσεις μέγιστης ωριαίας βροχόπτωσης κάθε σταθμού με τον αντίστοιχο αριθμό των κεραυνών σε ακτίνα διερεύνησης 50 km γύρω από το σταθμό και τη συσχέτιση που προκύπτει για τα δύο μεγέθη. Ο συντελεστής προσδιορισμού εξετάζεται σε ένα χρονικό διάστημα 24ωρ ωρών το οποίο περιλαμβάνει 12 ώρες πριν και μετά από την έντονη βροχή. Μόνο τα μη-μηδενικά ζεύγη βροχή-κεραυνών λαμβάνονται υπόψη για την εκτίμηση του συντελεστή προσδιορισμού. Η συσσώρευση της βροχής και ο αριθμός των κεραυνών είναι ωριαία και το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της βροχής των κεραυνών αφορά χρονικές υστερήσεις από 0 έως 60 λεπτά με δεκάλεπτο χρονικό βήμα. Η μέση ωριαία βροχή για τις πιο έντονες εκδηλώσεις ωριαίας βροχόπτωσης επί όλων των βροχομετρικών σταθμών είναι 28.29mm/h και ο αντίστοιχος μέσος αριθμός των αστραπών είναι περίπου 28 light/h. Σε 10 από τους 22 βροχομετρικούς σταθμούς η έντονη εκδήλωση βροχής είναι επίσης μια εκδήλωση καταιγίδας με πολλούς κεραυνούς (> 5 light/h). Μόνο μια μειοψηφία των σταθμών μέτρησης με μεγάλη ωριαία βροχόπτωση (6 από τους 22 σταθμούς) δε φαίνεται να έχει κεραυνούς στην ευρύτερη περιοχή. Η έλλειψη κεραυνών σε γεγονότα υψηλής βροχόπτωσης μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους όπως για παράδειγμα η βροχή να είναι στρατόμορφη, ή να οφείλεται σε ορογραφικούς παράγοντες, ή ακόμα στο ότι καταιγίδα να έχει μια διαφορετική πορεία. Όσον αφορά τον συντελεστή προσδιορισμού, στα 50 λεπτά υστέρηση επιτυγχάνεται η υψηλότερη συσχέτιση καθώς ο μέσος συντελεστής προσδιορισμού για όλους τους σταθμούς σε αυτή την περίπτωση φθάνει το 0.36, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.21.

Σύμφωνα με τον πίνακα της Εικόνα 5.21, οι 5 από τους 10 σταθμούς μέτρησης (50% των σταθμών) με έντονη καταιγίδα, έχουν μέτρια-ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της συσσώρευσης της βροχής και του αριθμού των κεραυνών. Τα 5 γεγονότα που εμφανίζουν τη μεγαλύτερη συσχέτιση (επισημαίνονται με κόκκινο) παρουσιάζονται στο γράφημα της Εικόνα 5.21 για τη βέλτιστη χρονική υστέρηση, όπως δίδεται στον πίνακα. Σύμφωνα με τα γραφήματα της Εικόνα 5.21 για τα πιο χαρακτηριστικά γεγονότα, όσο περισσότερη βροχή τόσο περισσότεροι κεραυνοί υπάρχουν στη γύρω περιοχή. Ακόμα, στην Εικόνα 5.22 παρουσιάζονται λεπτομερέστερα τα πιο χαρακτηριστικά γεγονότα με τα αντίστοιχα διαστήματα εμπιστοσύνης (95%).

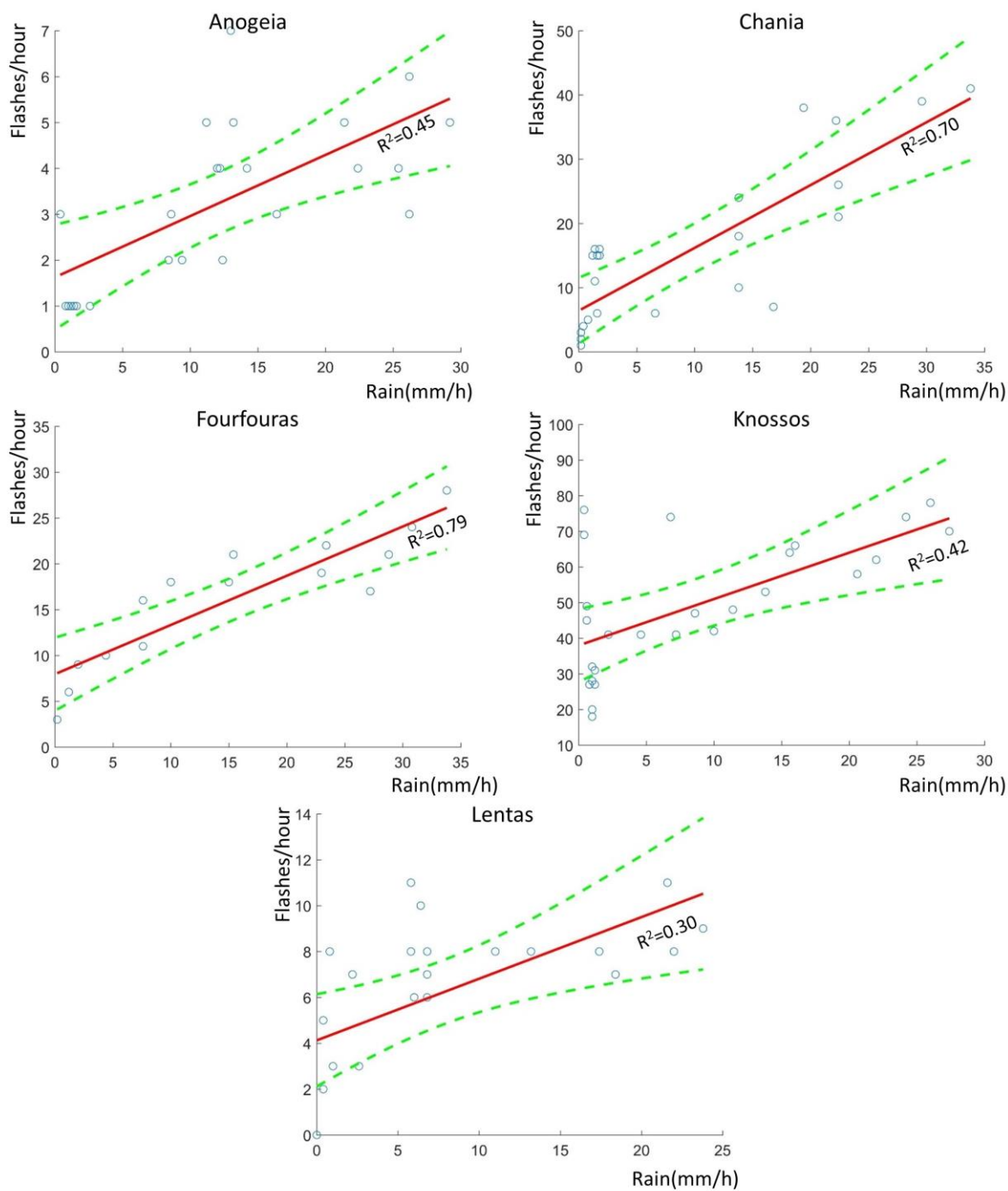
Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα



Station	Event characteristics			Coefficient of determination (R^2)						
	Max intensity (mm/h)	Max Flashes (flashes/h)	Date	Lag: 0	10	20	30	40	50	60
Agios Nikolaos	16.2	2	27/12/2013							
Alikianos	16.2	0	3/12/2013							
Anogeia	29.2	7	16/12/2013	0.23	0.27	0.27	0.35	0.35	0.45	0.45
Chania	33.8	41	24/10/2012	0.17	0.30	0.52	0.70	0.70	0.62	0.62
Chania Center	17.2	3	9/10/2012							
Falasarna	39.2	0	28/1/2014							
Fourfouras	33.8	28	7/9/2013			0.25	0.39	0.68	0.79	0.56
Fragma Potamon	22.6	0	5/3/2014							
Heraclion Port	73	2	27/12/2013	0.31	0.31	0.30	0.33	0.35	0.33	0.31
Ierapetra	36.4	0	7/3/2014							
Knossos	27.4	81	17/11/2012					0.15	0.26	0.42
Lentas	23.8	11	20/11/2012						0.30	0.30
Metaxochori	28.6	1	21/9/2013							
Moires	18.4	2	26/1/2014							0.19
Paleochora	14.2	39	20/11/2012				0.17			
Plakias	25.8	0	14/5/2013							
Rethymno	19.4	0	9/10/2012							
Samaria	21.6	72	20/11/2012	0.24	0.16	0.16				
Sitia	26.6	3	25/12/2013	0.37	0.33	0.25				
Spili	20.4	30	25/1/2014				0.14	0.14	0.16	0.16
Tzermiado	17	161	8/11/2012				0.05	0.11	0.22	0.22
Vryses	61.6	139	16/11/2012			0.14	0.19	0.17	0.16	0.14
AVERAGE	28.29	28.27		0.26	0.27	0.27	0.29	0.33	0.36	0.34

Εικόνα 5.21: Ο συντελεστής προσδιορισμού μεταξύ βροχής και κεραυνών για τη μεγαλύτερη ωριαία βροχόπτωση κάθε βροχομετρικού σταθμού.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα



Εικόνα 5.22: Ο συντελεστής προσδιορισμού για τα πιο χαρακτηριστικά γεγονότα της Εικόνα 5.21 με τα διαστήματα εμπιστοσύνης (95%, πράσινες γραμμές).

6 Συμπεράσματα & μελλοντική έρευνα

6.1 Υφέσεις και βροχή

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή εξετάστηκε η πιθανότητα των υφέσεων στην περιοχή της μεσανατολικής Μεσογείου να προκαλέσουν επεισόδια μέσης, έντονης και σφοδρής βροχόπτωσης στην Κρήτη με χρήση δεδομένων βροχής και επιφανειακών ατμοσφαιρικών πιέσεων της περιόδου 1979-2011. Έγινε υπολογισμός χαρτών πιθανοτήτων με απλές και σταθμισμένες πιθανότητες υπολογισμένες για κάθε κελί του πλέγματος πάνω από την περιοχή μελέτης. Στη συνέχεια, αξιολογήθηκε η προγνωστική δυναμική των χαρτών όσον αφορά την εύρεση επεισοδίων διαφορετικής έντασης βροχής, προτείνοντας ένα διαγνωστικό μοντέλο βροχής το οποίο αξιοποιώντας την πληροφορία που δίνουν οι υφέσεις θα μπορεί να προειδοποιεί εγκαίρως για δυνητικά ακραίες βροχοπτώσεις.

Η ανίχνευση των υφέσεων και της πορείας αυτών, καθώς και τα χαρακτηριστικά των υφέσεων όπως το βάθος, η ένταση και η ακτίνα, επιτυγχάνεται με τη χρήση του αλγορίθμου MS Scheme. Οι υφέσεις και οι βροχοπτώσεις που καταγράφηκαν στους μετεωρολογικούς σταθμούς σχετίζονται ανάλογα με τη θέση της ύφεσης σε σχέση με την Κρήτη και τη χρονική ταύτιση των δύο φαινομένων (βροχής και ύφεσης). Οι απλοί και σταθμισμένοι χάρτες πιθανοτήτων υπολογίζονται ανάλογα με τον αριθμό ενεργών-επιδρώντων υφέσεων σε σχέση με το σύνολο των διερχόμενων υφέσεων για κάθε κελί του πλέγματος και για κάθε κατηγορία βροχής. Προκειμένου να γίνει η προγνωστική αξιολόγηση των πιθανοτικών χαρτών, το σύνολο των υφέσεων χωρίζεται σε τυχαίες ομάδες δοκιμής και εκπαίδευσης και με τη χρήση των στατιστικών μέτρων της ευαισθησία, της ειδικότητας και της ακρίβειας διερευνάται η απόδοσή τους στην πρόγνωση της βροχής. Η γενίκευση της αξιολόγησης της πρόβλεψης των πιθανοτικών χαρτών επιτυγχάνεται μέσω της προσομοίωσης Monte Carlo ($\times 100$) σε συνδυασμό με τη μέθοδο της διασταυρωμένης επικύρωσης σε k μέρη ($k=10$) δημιουργώντας έναν ικανοποιητικό αριθμό ανεξάρτητων πειραμάτων. Οι πιθανοτικοί χάρτες αξιολογούνται επίσης για τις περιπτώσεις που διαπιστώθηκαν πλημμύρες στην Κρήτη.

Οι υψηλότερες πιθανότητες ενεργών υφέσεων βρέθηκαν νότια της Ιταλίας. Οι μεγαλύτερες ημερήσιες συγκεντρώσεις βροχής προκαλούνται από υφέσεις σε νοτιότερες κατευθύνσεις σε σχέση με τις βροχές μικρότερης ημερήσιας συγκέντρωσης, οι οποίες σχετίζονται κυρίως με πιο βόρειες υφέσεις. Σχετικά με την προγνωστική ικανότητα των πιθανοτικών χαρτών, τα στατιστικά

μέτρα της ευαισθησίας, της ειδικότητας και της ακρίβειας κυμαίνονται μεταξύ 0.6 έως 0.8 για τυχαία πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Όλοι οι διαφορετικοί συνδυασμοί των χαρτών πιθανότητας είναι ικανοποιητικοί με τον καθένα να έχει καλύτερη απόδοση σε διαφορετικά μέτρα. Τα επιλεγμένα κατώφλια πιθανότητας πάνω από τα οποία μία ύφεση μπορεί να χαρακτηριστεί ως ενεργή επιλέχθηκαν με γνώμονα τη βελτιστοποίηση της πλειοψηφίας των στατιστικών μέτρων για τους διαφορετικούς συνδυασμούς των χαρτών πιθανοτήτων. Το μέτρο της ευαισθησίας παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, ειδικά για τα επεισόδια σφοδρών βροχοπτώσεων, καθώς αυτά είναι κυρίως τα γεγονότα που χρήζουν έγκαιρης προειδοποίησης. Η αξιολόγηση συγκεκριμένων γεγονότων πλημμύρας στην Κρήτη δίνει επίσης ενδιαφέροντα αποτελέσματα, φθάνοντας σε πολλές περιπτώσεις το 0.8 στα στατιστικά μέτρα της ευαισθησίας και της ειδικότητας.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, γίνεται χρήση διαφορετικών παραμέτρων των υφέσεων για την πρόβλεψη επεισοδίων βροχής (μέσης, έντονης ή σφοδρής βροχόπτωσης). Η πολύ αποδοτική χρήση των πιθανοτικών χαρτών από άποψη υπολογιστικών πόρων, χρόνου και πολυπλοκότητας, θέτει πολύ υψηλές προσδοκίες για το μοντέλο πρόβλεψης της βροχής. Τα αποτελέσματα αποτελούν ένα χρήσιμο συμπληρωματικό εργαλείο στην πρόγνωση της βροχής.

6.2 Κεραυνοί και βροχή

Χωρική και χρονική πληροφορία από ένα δίκτυο βροχομετρικών σταθμών στην Κρήτη και δεδομένα κεραυνών από το δίκτυο GLN αξιοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της υψηλής-ακραίας βροχόπτωσης και των κεραυνών. Για την επίτευξη αυτού του στόχου εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικές μεθοδολογίες. Στην πρώτη, έγινε αναζήτηση βροχομετρικών σταθμών με καταγεγραμμένη βροχόπτωση σε μια περιοχή αναζήτησης που οριοθετείται από το κέντρο της ομάδας κεραυνών και μια ακτίνα εντοπισμού. Στη δεύτερη, έγινε αναζήτηση μεμονωμένων κεραυνών σε μια περιοχή αναζήτησης που οριοθετείται από το κέντρο του βροχομετρικού σταθμού και μια ακτίνα εντοπισμού.

Αναφορικά με τη μέθοδο των ομάδων που χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ βροχής και κεραυνών, για την πλειοψηφία των ομάδων κεραυνών υπήρξε τουλάχιστον ένας σταθμός με καταγραφή τουλάχιστον 5 mm βροχής σε περίοδο μίας ώρας. Η βέλτιστη ακτίνα διερεύνησης εντός της οποίας η σύμπτωση βροχής-κεραυνών φτάνει το 60% είναι τα 25-30 km

κάτι που έρχεται σε συμφωνία με τους (Soula and Chauzy 2001). Συγκεκριμένα για ακτίνα 30 km, η σύμπτωση μεταξύ βροχής και κεραυνών ξεπερνά το 80%, όταν υπάρχουν περισσότεροι από 150 κεραυνοί στην ομάδα. Με βάση αυτό μπορούμε να υποστηρίξουμε ότι όταν υπάρχουν ομάδες με μεγάλο αριθμό κεραυνών, σε περιοχή αναζήτησης με ακτίνα εντοπισμού 30 χιλιομέτρων υπάρχει πιθανότητα ισχυρής βροχής. Γενικότερα, οι ομάδες κεραυνών που σχετίζονται με πιο έντονες βροχοπτώσεις, καλύπτουν ευρύτερη περιοχή, είναι μικρότερης χρονικής διάρκειας και με μεγαλύτερο αριθμό κεραυνών από εκείνες που σχετίζονται με γεγονότα χαμηλότερης βροχόπτωσης.

Για τον προσδιορισμό της συσχέτισης μεταξύ βροχής και κεραυνών χρησιμοποιήθηκε επίσης το μέτρο του συντελεστή προσδιορισμού. Ο συντελεστής προσδιορισμού εφαρμόστηκε σε χρονοσειρές κεραυνών και βροχής για διαφορετικά χρονικά παράθυρα, χρονικές υστερήσεις και ακτίνες εντοπισμού. Για την εφαρμογή του μέτρου αυτού ελήφθησαν υπόψη μόνο τα ‘ενεργά’ ζεύγη βροχής-κεραυνών, δηλαδή τα ζεύγη εκείνα που δεν έχουν μηδενικές τιμές ούτε για τη βροχή αλλά ούτε για τους κεραυνούς. Εξετάστηκε το σύνολο των χρονοσειρών κάθε σταθμού αλλά και οι πιο έντονες εκδηλώσεις ωριαίας βροχόπτωσης κάθε βροχομετρικού σταθμού. Δέκα από τις 22 περιπτώσεις έντονης βροχόπτωσης στους βροχομετρικούς σταθμούς διαπιστώθηκαν να είναι καταιγίδες με κεραυνική δραστηριότητα σε μια ακτίνα 50 χιλιομέτρων γύρο από το σταθμό. Το 50% αυτών των εκδηλώσεων καταιγίδας βρέθηκαν να έχουν συσχέτιση βροχής-κεραυνών μεγαλύτερη του 0.3. Η μέση συσχέτιση των χρονοσειρών βροχής καθορισμένης βροχόπτωσης με τους κεραυνούς δείχνει ότι όταν η συσσώρευση της βροχής είναι μεγαλύτερη, τότε η συσχέτιση με τον αριθμό των κεραυνών είναι υψηλότερη. Επίσης, παρατηρείται αύξηση της συσχέτισης όταν ο αριθμός των κεραυνών είναι μεγαλύτερος. Επιπροσθέτως, μικρότερα χρονικά παράθυρα (10 min) και χρονική υστέρηση 30 min δίνει τις βέλτιστες τιμές του μέσου συντελεστή προσδιορισμού και άρα της συσχέτισης. Και σε αυτή λοιπόν την περίπτωση παρατηρούμε ότι ένας μεγάλος αριθμός κεραυνών (πάνω από 10) σε μια απόσταση μέχρι και 50 km από το σταθμό μέτρησης είναι πιθανό να δώσει μια ισχυρή βροχόπτωση. Φυσικά για να μπορεί να δοθεί μια πιο ακριβής πρόβλεψη πρέπει να ληφθεί υπόψη και η θέση του σταθμού αλλά και οι γενικότερες επικρατούσες καιρικές συνθήκες στην περιοχή μελέτης.

Η ‘αποκωδικοποίηση’ της σχέσης μεταξύ της κεραυνικής δραστηριότητας και των βροχοπτώσεων μπορούν να παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της καταιγίδας, όπως φάνηκε από την παραπάνω ανάλυση. Ο συνδυασμός της κεραυνικής

δραστηριότητας με άλλες μετεωρολογικές παραμέτρους είναι δυνατόν να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για την κατασκευή ενός συστήματος προειδοποίησης σχετικά με τις ακραίες βροχοπτώσεις.

6.3 Μελλοντική έρευνα

Η παραπάνω μεθοδολογία θα μπορούσε να πάει ένα βήμα παρακάτω μεταβαίνοντας από τους απλούς πιθανοτικούς χάρτες σε πιο σύνθετες και μοντέρνες μεθόδους κατηγοριοποίησης/λήψης-αποφάσεων όπως τα δέντρα αποφάσεων (πχ τυχαία δάση), τα νευρωνικά δίκτυα και τα bayesian δίκτυα. Διαφορετικές παράμετροι που αφορούν τις υφέσεις θα μπορούσαν να αποτελέσουν τις εισόδους σε τέτοια συστήματα, τα οποία σε επόμενο βήμα θα αποφαινόνται σχετικά με το εάν θα υπάρξει γεγονός βροχής ή όχι. Οι παραπάνω υλοποιήσεις μάλιστα εκτός από τη λειτουργία τους ως μονάδες, μπορούν να συμμετέχουν στη λήψη αποφάσεων για την πρόβλεψη της βροχής με ‘ψήφο’, με ή χωρίς τη χρήση βαρών.

Επιπροσθέτως, θα μπορούσαν να αξιολογηθούν ως προς την προγνωστική τους δυνατότητα και άλλες παράμετροι (πέρα των υφέσεων και των κεραυνών) όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία κ.α. στην περιοχή μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, θα μπορούσε να διευρυνθεί το στατιστικό μοντέλο περαιτέρω ώστε να αντλείται πληροφορία και από άλλους παράγοντες που να αφορούν τις μετεωρολογικές παραμέτρους της περιοχής στην οποία υπάρχει πιθανότητα βροχόπτωσης.

Με βάση τα παραπάνω, θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένα μοντέλο πρόγνωσης της βροχής το οποίο θα λαμβάνει αποφάσεις από πολλαπλά υποσυστήματα. Το κάθε υποσύστημα, μπορεί να χρησιμοποιεί διαφορετικές παραμέτρους και μεθόδους για να λάβει την απόφασή του. Αφού κάθε υποσύστημα καταλήξει σε απόφαση, θα γίνεται διαχείριση των επιμέρους αποφάσεων από ένα υπερσύστημα, με κριτήριο τη βελτιστοποίηση των προγνώσεων.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι τα αποτελέσματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής υπόκεινται σε περιορισμούς αναφορικά με τα δεδομένα και τη μεθοδολογία: α) η πυκνότητα των βροχόμετρων είναι μάλλον χαμηλή και ως εκ τούτου, τα δεδομένα μπορεί να μην αντιπροσωπεύουν επαρκώς την περιοχή, β) η απόδοση του δικτύου κεραυνών, όπως σε όλα τα δίκτυα μεγάλης εμβέλειας δεν είναι 100%, γ) η μορφολογία του εδάφους και η κατεύθυνση και προέλευση των καταιγίδων δεν λαμβάνονται υπόψιν. Παρόλα αυτά, η χρήση της κεραυνικής δραστηριότητας κρίνεται πολύ αποτελεσματική δεδομένου ότι μπορεί να ανιχνευθεί χιλιάδες

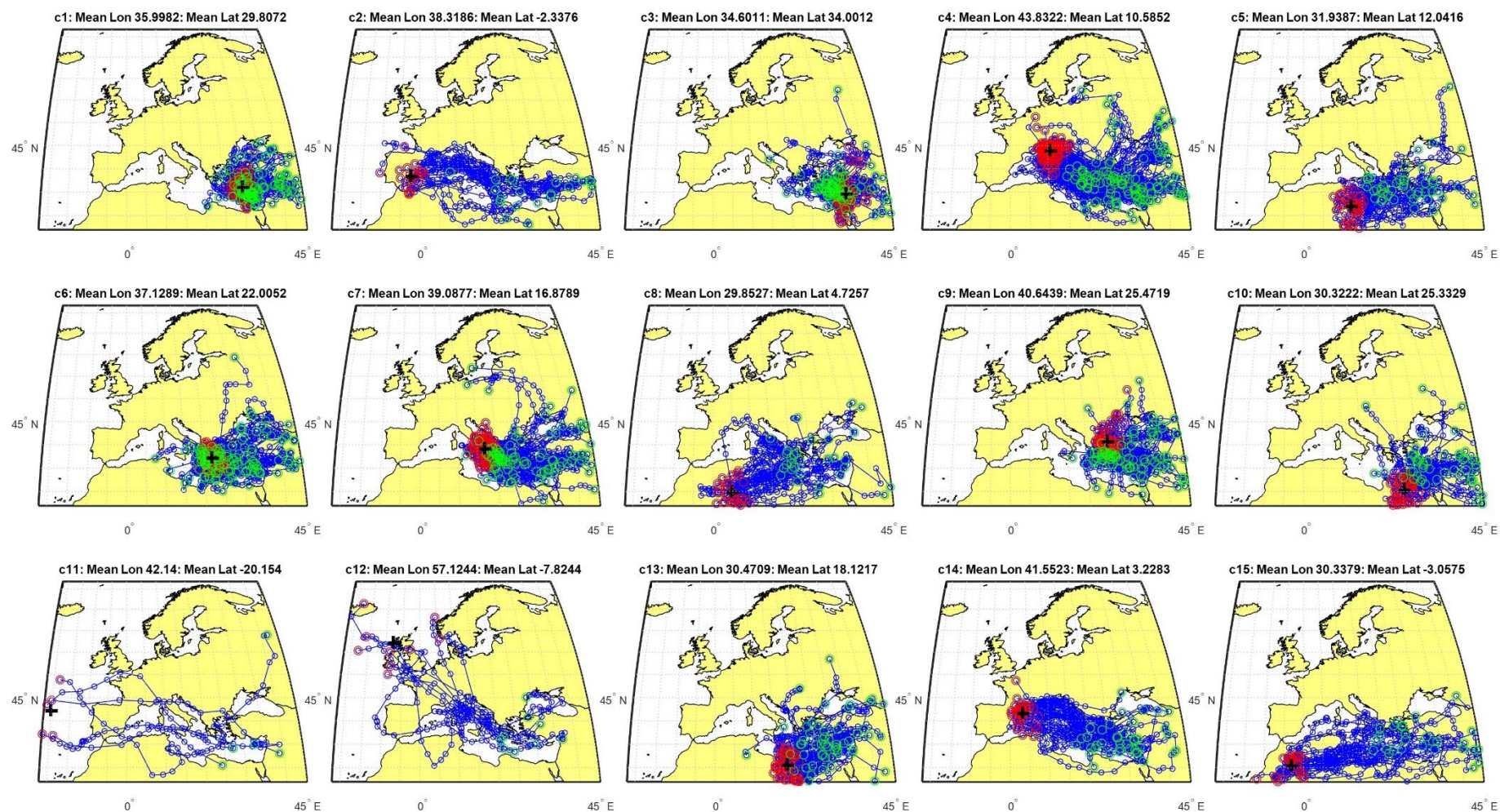
χιλιόμετρα μακριά από την πηγή της, με σχετικά υψηλή ακρίβεια. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, ιδιαίτερα για τις περιοχές που δεν καλύπτονται από ραντάρ ή δεν έχουν τοπικά μετεωρολογικά συστήματα (Kohn et al. 2011). Στη μελλοντική έρευνα θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν παραπάνω θεωρήσεις και αναφορικά με το χαρακτήρα της καταιγίδας και σε σχέση με τις επιμέρους ιδιαιτερότητες των βροχομετρικών σταθμών.

Τέλος, τα παραπάνω μπορούν να εφαρμοστούν σε δεδομένα που προέρχονται από κλιματικά μοντέλα, ώστε διερευνηθούν οι τάσεις και οι διαφοροποιήσεις των υφέσεων και των βροχών στο μέλλον.

7 Παράρτημα

7.1 Συμπληρωματικές πληροφορίες για τις υφέσεις που σχετίζονται με βροχή στην Κρήτη

Κεφάλαιο 7: Παράρτημα



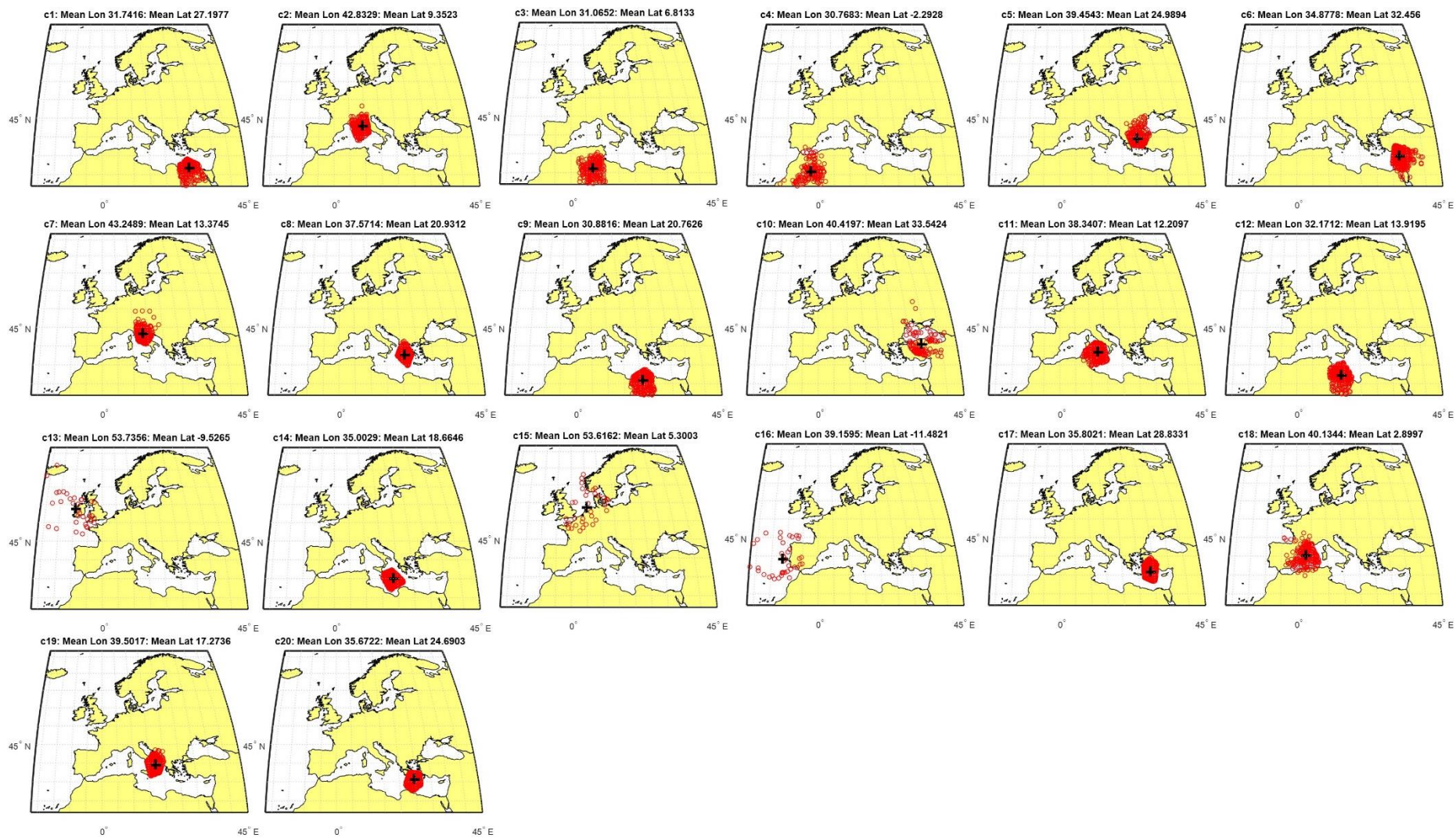
Εικόνα 7.1: Οι τροχιές των ενεργών υφέσεων (για βροχή >10mm/day) για την περίοδο 1979-2011 χωρισμένοι σε χωρικές ομάδες ανάλογα με την προέλευσή τους.

Κεφάλαιο 7: Παράρτημα

<i>Cluster</i>	<i>Lon</i>	<i>Lat</i>	<i>Αριθμός υφέσεων</i>	<i>1</i>	<i>1.5</i>	<i>2</i>	<i>2.5</i>	<i>3</i>	<i>3.5</i>	<i>4</i>	<i>4.5</i>	<i>5</i>	<i>5.5</i>	<i>6</i>	<i>6.5</i>	<i>7</i>	<i>7.5</i>	<i>8</i>	<i>max</i>
<i>c1</i>	29.81	36.00	105	26	25	23	21	19	18	17	17	18	18	18	19	19	19	19	26
<i>c2</i>	-2.34	38.32	21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>c3</i>	34.00	34.60	88	6	7	9	10	11	12	13	14	14	15	15	14	14	13	12	15
<i>c4</i>	10.59	43.83	124	6	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
<i>c5</i>	12.04	31.94	45	10	10	9	9	8	9	9	8	7	7	7	7	8	8	9	10
<i>c6</i>	22.01	37.13	128	35	36	37	37	37	36	35	33	32	31	30	29	28	27	25	37
<i>c7</i>	16.88	39.09	95	23	23	24	23	22	22	22	22	21	20	19	18	16	15	15	24
<i>c8</i>	4.73	29.85	30	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<i>c9</i>	25.47	40.64	95	15	15	16	17	17	18	19	19	20	20	20	20	19	19	18	20
<i>c10</i>	25.33	30.32	49	28	27	27	29	29	30	31	32	34	35	36	34	31	28	24	36
<i>c11</i>	-20.15	42.14	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>c12</i>	-7.82	57.12	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>c13</i>	18.12	30.47	54	17	13	13	14	15	16	17	19	20	20	22	22	23	23	23	23
<i>c14</i>	3.23	41.55	40	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
<i>c15</i>	-3.06	30.34	28	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2

Πίνακας 7.1: Ο αριθμός υφέσεων ανά ομάδα και η πιθανότητα οι υφέσεις που περνούν σε απόσταση διαφορετικής ακτίνας από το κέντρο του cluster να είναι ενεργές.

Κεφάλαιο 7: Παράρτημα



Εικόνα 7.2: Οι ενεργές υφέσεις για την περίοδο 1979-2011 χωρισμένες σε χωρικές ομάδες.

Κεφάλαιο 7: Παράρτημα

CLUSTER	LON	LAT	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	MAX
C1	27	32	55	51	49	47	42	40	37	32	27	22	19	17	16	16	16	55
C2	9	43	5	6	5	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
C3	7	31	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
C4	-2	31	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	3
C5	25	39	20	19	20	21	22	22	23	22	22	22	22	21	20	18	16	23
C6	32	35	4	5	6	7	8	8	9	9	10	10	10	11	10	10	10	11
C7	13	43	5	5	5	6	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
C8	21	38	31	31	33	33	33	32	31	30	29	28	27	26	25	23	22	33
C9	21	31	19	20	20	22	22	22	23	25	26	26	27	28	28	28	28	28
C10	34	40	1	2	1	2	2	3	2	3	3	4	4	4	5	6	6	6
C11	12	38	15	15	15	15	15	14	13	12	11	11	11	11	11	11	10	15
C12	14	32	11	10	11	11	11	11	12	13	13	13	13	13	12	12	12	13
C13	-10	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C14	19	35	52	48	46	41	38	36	33	31	30	29	27	26	25	24	23	52
C15	5	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C16	-11	39	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
C17	29	36	24	28	28	26	22	19	16	15	14	14	14	14	14	14	14	28
C18	3	40	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
C19	17	40	22	20	20	20	19	20	20	20	19	18	17	16	15	14	14	22
C20	25	36	57	53	49	43	39	37	36	34	33	31	28	25	22	19	18	57

Πίνακας 7.2: Η πιθανότητα οι υφέσεις που περνούν σε απόσταση διαφορετικής ακτίνας από το κέντρο της ομάδας να είναι ενεργές.

7.2 Οι δημοσιεύσεις

Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 15, 1807–1819, 2015
www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/15/1807/2015/
doi:10.5194/nhess-15-1807-2015
© Author(s) 2015. CC Attribution 3.0 License.



Natural Hazards
and Earth System
Sciences



Mediterranean cyclone characteristics related to precipitation occurrence in Crete, Greece

V. Iordanidou¹, A. G. Koutroulis¹, and I. K. Tsanis^{1,2}

¹Department of Environmental Engineering, Technical University of Crete, GR73100 Chania, Greece

²Department of Civil Engineering, McMaster University, Hamilton, ON, L8S 4L7, Canada

Correspondence to: I. K. Tsanis (tsanis@hydromech.gr)

Received: 30 May 2014 – Published in Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.: 30 September 2014

Revised: 11 June 2015 – Accepted: 31 July 2015 – Published: 13 August 2015

Abstract. The characteristics of the cyclone tracks that caused precipitation events of variable intensity for the period 1979–2011 over the island of Crete are presented. The data set used for cyclone identification is the $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 30 years European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA-Interim mean sea-level pressure. Cyclone characteristics are calculated with the aid of the Melbourne University algorithm (MS scheme). Daily precipitation data from a dense gauging network over the island of Crete are also used for the classification of the precipitation events in terms of rain accumulation (intensity). Daily precipitation is classified in three categories and the associated cyclones are chosen according to their distance from Crete island. The seasonal and annual cycle of the physical characteristics of the cyclone tracks are investigated with respect to the cyclones' relative position to the island of Crete. It was found that cyclones affecting Crete most frequently approach from the western side of the island and the actual cyclone centers associated with precipitation events are usually located northwest and southeast of the Crete domain. Cyclone-induced rainfall increases in function to cyclones' depth, radius and propagation velocity increase as well as cyclones' pressure decrease. Spring cyclones that affect Crete with rainfall present lower pressures and higher cyclone propagation velocity in contrast to the ones associated with winter and autumn precipitation events. The examination of the relation between cyclone characteristics and precipitation occurrence provides valuable information related to forecasting potential and management of the water resources and the rainfall extremes.

1 Introduction

In the Mediterranean region, a great number of precipitation events are triggered by cyclonic circulation patterns (Jansa et al., 2001b; Lionello et al., 2006). The extratropical cyclonic circulation patterns are frequently associated with wind, heavy precipitation and changes in temperature (Ulbrich et al., 2003), generating high risk situations such as flash floods and large-scale floods with significant impacts on human life and built environment. Particularly in the Mediterranean region, flood events are highly related to specific cyclone pathways (Jansa et al., 2001a). Mediterranean cyclones are responsible for the majority of extreme weather phenomena, governing the time of occurrence as well as the magnitude of their extreme values (Lionello et al., 2006).

The identification, tracking and evaluation of cyclone characteristics has been the subject of much research, providing diverse results even when the examined data sets are identical (Neu et al., 2013; Ulbrich et al., 2009). In an effort towards objective analysis, automated systems and algorithms have been developed for the identification and tracking of cyclones as well as the extraction of their characteristics based on spatio-temporal data sets of mean sea-level pressure (MSLP). Neu et al. (2013), after comparing 15 detection and tracking schemes (including the MS scheme) on a common cyclonic data set, found that there are differences in the number of cyclones, their lifetime, frequency as well as their characteristics, such as depth and speed.

The state-of-the-art cyclone finding and tracking scheme (MS scheme) developed at the Melbourne University, Australia (Murray and Simmonds, 1991), has been widely used for the definition of closed and open systems on reanalysis data and has proven to be effective, not only for the genera-

tion of an objective climatology, but also for the assessment of individual tracks in an inland sea with complex shoreline topography, such as the Mediterranean. Evaluation of the MS scheme has demonstrated its efficiency for both the detection of individual tracks as well as its effectiveness in providing cyclone climatologies (Flocas et al., 2010; Leonard et al., 1999; Simmonds and Murray, 1999). While the MS scheme is capable of identifying cyclones in a range of locations with different characteristics, it has previously been employed in the eastern Mediterranean for the identification and analysis of cyclones (Flocas et al., 2010) and explosive cyclones' characteristics (Kouroutzoglou et al., 2011a).

Many studies have thoroughly investigated various characteristics of Mediterranean cyclones including cyclogenesis, temporal variability, location and dynamics. Trigo et al. (1999) performed cyclone detection and tracking using the criterion of geopotential height in order to identify cyclogenesis and cyclolysis regions, as well as cyclone characteristics including duration and intensity in the Mediterranean region. Their findings include strong cyclogenesis activity in the Gulf of Genoa region, south of the Atlas Mountains and in the Middle East, as well as high frequency and unexpectedly high intensity of spring lows over North Africa. An evaluation of the structure and variability of cyclones affecting the eastern Mediterranean region for the 1962–2001 40 year period was performed by Flocas et al. (2010), using the MS scheme, verifying considerable intermonthly variations for eastern Mediterranean track density. For the same period and using the same scheme, (Kouroutzoglou et al., 2011a) investigated the characteristics and behavior of Mediterranean explosive cyclones as well as their vertical structure (Kouroutzoglou et al., 2012). Furthermore, Maheras et al. (2001) and Bartholy et al. (2008) identified and analyzed the synoptic-scale cyclones that occurred in the Mediterranean region for the periods 1958–1997 and 1957–2002, respectively, focusing on the frequency of occurrence, location, genesis and seasonal variations.

Except for cyclone parameters and tracks, many studies have investigated the association of cyclones with precipitation. According to Flaounas et al. (2014) who examined the 200 most intense cyclones over a 20 year period, the strongest rainfall is observed close to the center of the cyclone, suggesting relative weakness of the Mediterranean cyclones compared to cyclones formed over the main oceans. Jansa et al. (2001) investigated the simultaneous occurrence of heavy precipitation and cyclonic centers for the western Mediterranean using data sets from relative databases. For the period 1958–2000, Karagiannidis et al. (2009) examined extreme precipitation events in Europe triggered by cyclones, focusing on the characteristics and trends of rain events rather than the features of the causative cyclones. Hawcroft et al. (2012) evaluated the contribution of mid-latitude cyclones to the precipitation of the Northern Hemisphere, showing association of precipitation with cyclones by over 70 % in two different reanalysis data sets. Similarly,

Catto et al. (2012) quantified the association of precipitation to the different categories of frontal systems and found, using information of global precipitation and reanalysis data, that up to 90 % of rainfall is due to cold and warm fronts. Also, Miglietta et al. (2013) found that it is before the mature cyclone phase when the most intense convective activity and rainfall happens. In the same manner, Claud et al. (2010) stated that it is in the early stage of Mediterranean hurricanes (medicanes) that significant precipitation occurs.

The majority of extreme rain events in the Mediterranean region are associated with cyclones and rarely develop under different circumstances such as small convective cells (Lionello et al., 2006). Investigating the characteristics of the cyclones causing extreme precipitation is of great interest for the Mediterranean area, where the relatively small frequency of adverse weather and extreme events creates a false sense of safety that results many times in more damage and severe socio-economic consequences (Lionello et al., 2006). In this context, Jansa et al. (2001) investigated the cyclone–rain relationship considering the extreme cases of precipitation with heavy rain ($> 60 \text{ mm day}^{-1}$) and heaviest rain events ($> 100 \text{ mm day}^{-1}$) for different Mediterranean regions. Also, Tsanis et al. (2012) performed an analysis of cyclones associated with flood events, concentrating on the genesis, tracks and depth of those systems.

The goal of this study is to evaluate the characteristics of the cyclones related to precipitation events of specific accumulations in the island of Crete. Cyclone centers related to rainfall occurrence are identified and analyzed. Furthermore, the relationship between the intensity of the precipitation and both location (cyclone position) and quantitative characteristics (pressure, intensity, depth, radius and propagation velocity) of the cyclones is investigated. Here we make the hypothesis that a better understanding of the association of cyclonic characteristics and precipitation events will be helpful for early warning against extreme events that can potentially pose risk to life and property. The analysis presented in this paper aims towards a better evaluation of the atmospheric systems' characteristics for cyclones suspected to be associated with rain events in the island of Crete.

2 Methodology and data sets

2.1 Methodology

The main goal of this research is to reveal the statistics of the cyclones causing precipitation of specific intensity intervals. Statistical analysis is performed on the cyclones, matched to defined rain categories. The origination, location and characteristics (pressure, intensity, depth, radius and propagation velocity) of those systems are distinguished and examined. The analysis is also extended concerning seasonality (winter, spring, autumn) of the events.

Here we consider that event intensity can be assessed according to the amount of rainfall accumulated at a gauging station over an arbitrary amount of time. Events are classified into three intensity intervals (rain categories) with respect to the 50th, 95th and 99.5th percentiles of cumulative daily precipitation according to the empirical data distribution. Each percentile is estimated for every station and then the average of the corresponding percentiles of all the stations is used as a boundary for each rain category. The concept of choosing the specific percentiles is the statistical analysis of cyclones, associated with precipitation outside of the average pattern. In particular, the 99.5th percentile concerns extreme rain events over 100 mm day^{-1} which, on average, affects a gauging station in Crete once in every 3.5 years (there is a different return period for every station). The percentiles for every gauging station are estimated after the exclusion of “dry” days (lower than 1 mm day^{-1}). We consider a rain event to have occurred if at least one of the stations has records of rain within the intervals of the rain categories, so that rain of different severity categories can be recorded on a daily basis.

The cyclone identification and tracking in this analysis is carried out with the aid of the Melbourne University cyclone finding and tracking scheme (MS scheme) which uses the quasi-Lagrangian perspective (Murray and Simmonds, 1991; Simmonds and Murray, 1999). A special characteristic of the scheme is its ability of defining closed and open systems, with the aid of both pressure and relative vorticity fields (Flocas et al., 2010; Leonard et al., 1999; Ulbrich et al., 2009). This is a great asset of the algorithm because using just the information of local minima can exclude certain types of systems and in contrast, vorticity maxima are not always connected to local pressure minima. The parameters of the cyclone tracks are retrieved from the MS scheme and include the cyclone pressure, radius, depth, intensity and propagation velocity.

Radius R is defined as

$$R^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i^2, \quad (1)$$

where r_i is the distance of the radial line from the cyclone center to the points at which the Laplacian of the pressure is zero (at the edge of a cyclone) and N is the number of the radial lines drawn for every 20° (Lim and Simmonds, 2007; Murray and Simmonds, 1991).

The intensity of the cyclone is given by the Laplacian of the central pressure $\nabla^2 P$ (Lim and Simmonds, 2007; Murray and Simmonds, 1991; Simmonds and Keay, 2000). The depth D of the cyclone is defined as

$$D = \frac{1}{4} R^2 \nabla^2 P. \quad (2)$$

The depth of the cyclone represents the general influence of the cyclone in terms of intensity and scale as it is proportional to $\nabla^2 P$ and R .

Finally, the propagation velocity of the cyclone is given by

$$U = \sqrt{U_E^2 + U_N^2}, \quad (3)$$

where U_E is the eastward component of cyclone-steering velocity and U_N is the northward component of cyclone-steering velocity.

Regarding tracking algorithms, there are inconsistencies within the context of the estimation of the cyclone center and radius (Neu et al., 2013). Detailed distance measures, such as from the cyclone center to the gauging station can convey insufficient information when MSLP data set grid spacing is set at poor resolutions. Accordingly, this estimation of exact distances between the cyclone center and each gauging station could lead to the omission of rain events associated with the corresponding cyclone. Motivated by this, a method of spatial matching between cyclone appearance and precipitation events in the area of interest is proposed here. The simple measure of Euclidian distance between the cyclone center and a boundary surrounding the entire area of interest is considered appropriate to overcome uncertainties concerning cyclone exact position and size. In order to restrict the area of interest, a rectangle boundary enclosing it is defined. So, a cyclone is considered to be sufficiently close to Crete when its radius is greater than the cyclone's center Euclidian distance to the rectangle boundary surrounding the area of interest. For this approach to be accurate, it is necessary for the area of restriction to have dimensions comparable to the local cyclones' radius.

Another issue of interest is the temporal association of the cyclones to the precipitation events. The temporal synchronization of rain and cyclone recordings leads to a direct matching. However, the recordings of different data sets do not usually have temporal synchronization. In this context, if the rain data set has time intervals $[T_1, T_2]$ where T_1, T_2 are two consequent rain recordings, the cyclones responsible for event T_2 are those recorded within $[T_1, T_2]$. At this point, it has to be noted that when the exact time of the rain is not available (e.g., daily rain recordings) only an approximate simultaneity between cyclone occurrence and rain can be assumed. Thus, there is a possibility that the cyclone system/s considered as responsible for precipitation events are not actually triggering rain.

Finalizing the procedure, after the cyclones are matched to the defined rain events, resulting in the so-called “affecting” cyclones, their characteristics are evaluated.

2.2 Data sets

The data set used in this study for the identification of cyclone tracks involves analysis of MSLP data on a $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ regular latitude–longitude grid at a 6-hourly temporal resolution for the period 1979–2011 as derived from the ERA-Interim Reanalysis of ECMWF. The calibration scheme used in this study is equivalent to the one used by Flocas et al.

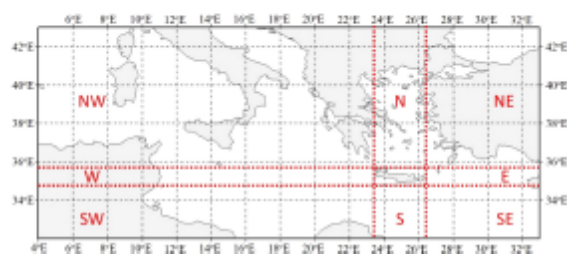


Figure 1. Location of study area and borders (red) of geographical sectors, corresponding to their relative position to the island of Crete.

Table 1. The rain categories according to the daily rainfall accumulation.

Rain category	Rain amount (mm day^{-1})
Mild	10–50
Strong	50–100
Heavy	> 100

(2010). Tracks in Mediterranean region have an average lifetime of 28 h when short-lived systems are excluded (Trigo et al., 1999). So, to be consistent with other studies (Bartholy et al., 2008; Flocas et al., 2010; Kouroutzoglou et al., 2011b; Lim and Simmonds, 2007; Murray and Simmonds, 1991; Neu et al., 2013; Simmonds and Murray, 1999) a minimum life span of 24 h is imposed on the tracks included in this analysis. In addition, short-lived cyclone systems lasting less than 24 h are not considered important as they provide less precipitation (Bartholy et al., 2008).

The study domain for the detection and identification of the cyclones includes part of the middle-eastern Mediterranean area and extends between 4–33° E and 32–43° N. The domain of Crete was defined within the domain of 23.4–26.4° E and 34.8–35.7° N. In Fig. 1 the study domain and Crete boundary are shown. The sectors of analysis are characterized as northwest (NW), north (N), northeast (NE), southwest (SW), south (S), southeast (SE), west (W) and east (E), considering their relative position to the Crete domain.

Three types of intensity are defined for daily precipitation in Crete, summarized in Table 1. Figure 2 presents the 50th, 95th and 99.5th percentiles for the whole gauging network of Crete, spatially interpolated with the inverse distance weighting (IDW) method.

Accumulated precipitation is recorded at 06:00 UTC on a daily basis for every station, while the cyclone tracks are extracted at a temporal resolution of every 6 h at 00:00, 06:00, 12:00 and 18:00 UTC, according to the MSLP data set. So the tracks considered to be responsible for a specific precipitation event are checked for the date the rainfall was measured at 00:00 and 06:00 UTC and also for the previous day at

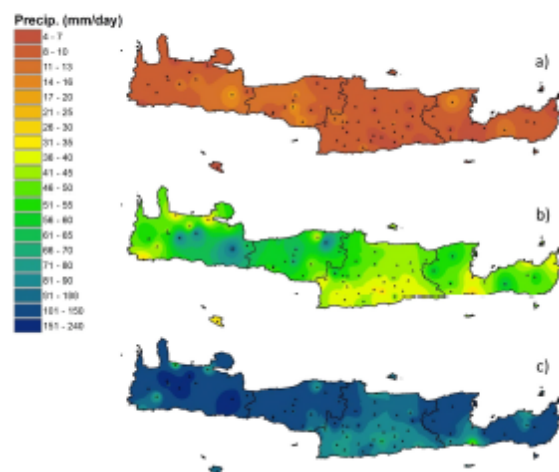


Figure 2. Spatially interpolated (IDW) daily precipitation fields for the (a) 50th percentile, (b) 95th percentile and (c) 99.5th percentile, based on records from 69 gauging stations.

18:00, 12:00 and 06:00 UTC in order to include every possible cyclone which could have caused the recorded precipitation in the analysis. This way, a day-long duration is checked for cyclone appearance for every rain recording.

3 Study site

This study is focused on the island of Crete which is located in the southern part of Greece. Crete is the largest island in Greece and one of the largest in the Mediterranean, with an area of 8265 km², mean elevation of 482 m, ranging from sea level to approximately 2450 m, and an average slope of 228 m km⁻¹. Crete has a subhumid Mediterranean climate, characterized by long, hot and dry summers and relatively humid and cold winters. As such, most annual rainfall occurs in winter and rarely during summer (Koutroulis et al., 2010). Also, the northwestern part of the island receives greater precipitation than the southeastern part (Chartzoulakis and Psarras, 2005; Koutroulis et al., 2010; Vrochidou and Tsanis, 2012). Precipitation in Crete varies between 440 mm year⁻¹ for lowland coastal areas and over 2000 mm year⁻¹ for mountainous areas such as Askifou upland in Chania (Koutroulis and Tsanis, 2010).

In the present study, precipitation characteristics are analyzed based on a data set of 69 daily gauging stations which are illustrated in Fig. 2. The WRDPC (Water Resources Department of the Prefecture of Crete) service is responsible for the compilation and quality of the daily precipitation records (Koutroulis et al., 2010). Out of the entire data set, 14 gauges recorded data for periods less than 10 years and 49 recorded data for more than 30 years. The temporal discontinuity of the rain recordings is of minor importance as the

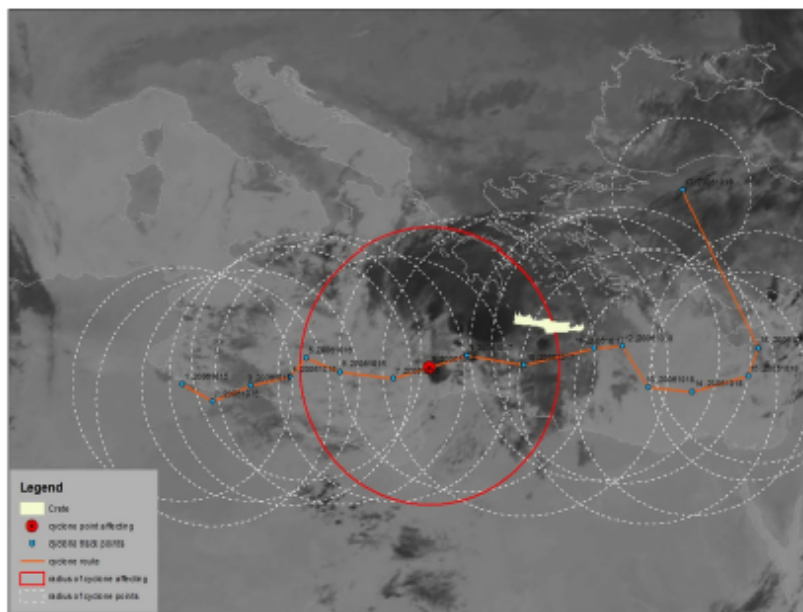


Figure 3. The track and radius of each track point of the cyclone which caused the flash flood in Almirida on 17 October 2006. The background information is the infrared METEOSAT image at 00:00 UTC on 17 October 2006.

Table 2. The precipitation events in Crete per season for the period 1979–2011. The non-shaded columns contain the number of precipitation events and the shaded columns show the relative frequency (%) of simultaneity of cyclone and rain.

	Mild rain		Strong rain		Heavy rain		Mean coincidence
	Events	%	Events	%	Events	%	
Annual	3402	54	966	70	278	76	66
Autumn	846	51	257	70	78	73	65
Winter	1720	54	540	68	159	76	66
Spring	760	59	156	75	37	81	72

present analysis focuses on the coincidence of cyclonic appearance with precipitation events; in this case there should be at least one gauge station which has rain records. Also, approximately 85 % of the gauge stations' records are found to be dry ($< 1 \text{ mm day}^{-1}$).

Characteristic flash flood events in Crete include those in the Gifyros basin on 13–14 January 1994 (Gaume et al., 2009; Koutroulis and Tsanis, 2010; Marchi et al., 2010) and in the Almirida basin on 17 October 2006 (Grillakis and Tsanis, 2010; Marchi et al., 2010; Tsanis et al., 2008, 2013), which have been thoroughly studied. Figure 3 presents an infrared METEOSAT snapshot at 00:00 UTC on 17 October 2006, corresponding to the accumulated water vapor of the atmospheric system, causing the flash flood event in the Almirida basin. The orange line shows the route of the cyclone passing through the blue points which correspond to the cyclone centers as estimated by the MS scheme. In the

figure, white dashed circles correspond to the radius of the cyclone centers and red circle to the radius of the red cyclone center which is the cyclone evident on the METEOSAT image. MS scheme estimation of the cyclone is accurate, comparing the cyclone location and its radius to the actual phenomenon recorded in the METEOSAT image. The cyclone track has an eastward direction, and at 00:00 UTC on 17 October, centered at a southwest position in relation to Crete's bounded area, it starts precipitating in agreement with Grillakis and Tsanis (2010).

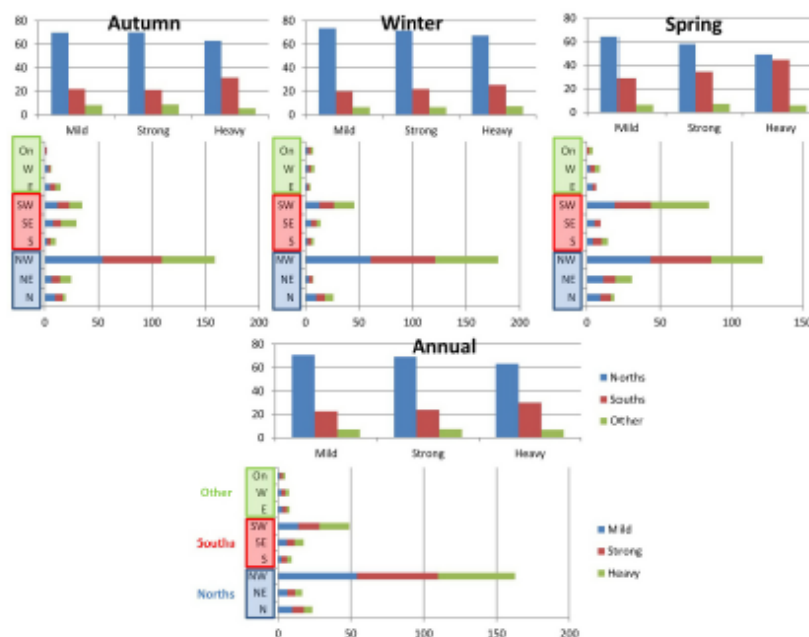


Figure 4. Annual and seasonal relative frequency (%) of the origination of cyclones affecting Crete, 1979–2011. The stacked bar diagrams concern every sector and the simple bar diagrams are the grouped results for north (N, NE, NW), south (S, SE, SW) and the remaining (E, W, On) sectors. On represents cyclones located within the Crete domain.

4 Results

4.1 Cyclone-induced rainfall

Most of the rain events occur in winter (50 % for mild rain, > 55 % for strong and heavy rain), followed with great difference by autumn and spring, consistent with Koutroulis et al. (2010). Considering all the available gauge stations, an annual average of 110 mild rain, 30 strong rain and 10 heavy rain events occur at different locations in Crete. The number of precipitation events per intensity category and season for the period of analysis is presented in Table 2. In addition, the percentage of the events which could be triggered by cyclones are estimated, concerning the coincidence of precipitation and the appearance of “affecting” cyclones within a sufficiently close distance from Crete’s boundary.

According to Table 2, mostly strong and heavy rainfall is caused by cyclones. As a matter of fact, 70 % of the annual rain events for strong rain are likely to be related to cyclone activity and 76 % of the annual rain events for heavy rain. In contrast, 54 % of the annual rain events for mild rain might be triggered by a cyclone passage. Annually, 66 % of the rainfall events in Crete are associated with a cyclone, in agreement with Catto et al. (2012) and Hawcroft et al. (2012) who found an approximately 60–70 % contribution of extratropical cyclones to precipitation north of 30° N. Taking into consider-

ation the seasonal results of Crete, it appears that for both strong and heavy events, rain–cyclone coincidence is greater in spring (up to 80 % for heavy rain) followed by winter and autumn. The remaining precipitation events that are not found to be connected to cyclones are either local-scale lows that cannot be captured by the MS scheme or are provoked due to the complex Cretan land topography and orographic effects (Lionello et al., 2006; Naoum and Tsanis, 2003).

4.2 Cyclones inducing rainfall over Crete: track analysis

Most of the “affecting” cyclones originate northwest and southwest of Crete and they have southeast and northeast directions, respectively, for the majority of cases. Figures 4 and 5 show in detail the variability of the cyclones’ origination and location for each of the sectors we have considered both seasonally and annually. There follows a comparison of the cyclone centers’ relative frequencies within the sectors, taking into consideration that the areas of the sectors are not equal.

On an annual basis, approximately 70–80 % of the cyclone centers originate northwest and southwest of Crete. More specifically, approximately 55 % of the cyclones are generated northwest and about 15 % southwest of Crete.

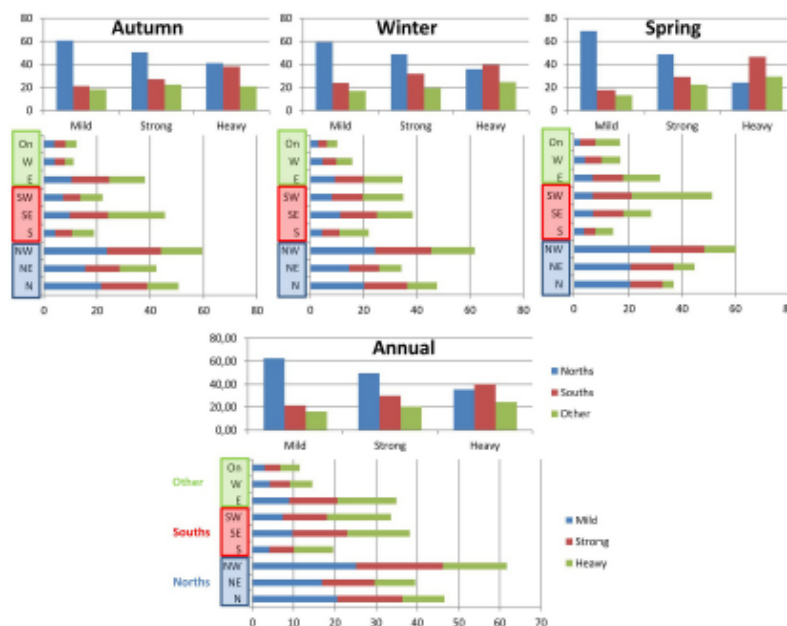


Figure 5. Annual and seasonal relative frequency (%) of the position of cyclones affecting Crete, 1979–2011. The stacked bar diagrams concern every sector and the simple bar diagrams are the grouped results for north (N, NE, NW), south (S, SE, SW) and the remaining (E, W, On) sectors. On represents cyclones located within the Crete domain.

Regarding seasonality, it can be observed that winter has the greatest percentage of northwest cyclones ($\sim 60\%$) and spring the least ($\sim 45\%$) while the exact opposite holds for the cyclones originating from southwest directions. Also, the more intense the precipitation, the greater the percentage of cyclones originating southwest compared to northwest. This holds for all seasons but it is more profound in spring where northwest cyclones reach to 40% of the total cyclones and southwest decrease to approximately 35%. Both Flocas et al. (2010) and Trigo et al. (1999) agree that there is an observed increase of the North African tracks in spring compared to the other seasons in agreement to our findings. This difference between winter and spring is more profound for heavy rain events.

The positions of the cyclones causing precipitation events in Crete are presented in Fig. 5. For both mild and strong rain, the majority of the cyclones centers are located north of Crete, reaching approximately up to 60 and 50% of the total events, respectively. In comparison with mild rain, the cyclone centers located in the south become more frequent than the ones in the north when heavy rain occurs. Northwest and southeast sectors are those that principally contribute in the north and south directions respectively.

In the seasonal analysis, in all cases there are fewer north cyclone centers as precipitation gets more intense with a proportional increase of cyclone centers located south. The most

profound example of this behavior is spring, where north cyclone centers decrease from 69% in mild rain cases down to 32% for heavy rain, and on the other hand south cyclone centers increase from 18 up to 47%. In particular, southwest and northwest centers are the principal south and north cyclone centers in spring.

4.3 Cyclones affecting Crete: characteristics' histograms

A cyclone mechanism can be described by many parameters including its pressure, intensity, depth, radius and propagation velocity. These characteristics constitute measures of cyclonic systems' importance and influence (Simmonds and Keay, 2000).

The histograms of the values for these characteristics are presented in Fig. 6. The histograms concern the parameters of the cyclone centers which have a sufficiently close distance from the boundary we have defined for Crete. More specifically, according to their location, they potentially affect Crete judging from their distance from the defined boundary and their radius.

According to the respective histograms, the values of pressure and radius follow normal distributions. On the other hand, intensity, depth and propagation velocity values have left skewed distributions. More than 85% of the pressure val-

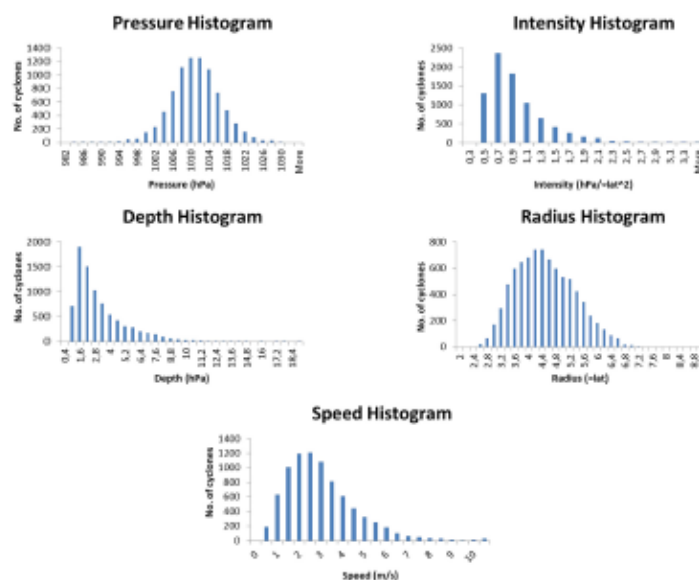


Figure 6. Histograms of the basic characteristics of the cyclone centers whose radius reach the Crete domain.

ues are in the range of 1002–1018 hPa, with a mean pressure of 1010 hPa. So, most of the cyclone systems surrounding Crete are weak and moderate according to the classification of Maheras et al. (2001).

Approximately 80 % of the intensity values of the cyclonic centers extend from 0.3 to 1.1 hPa° lat⁻² and their mean approaches 0.86 hPa° lat⁻². In addition, the majority of the cyclonic depth values are in the range of 0.4–4.6 hPa, giving a mean depth of 2.9 hPa, close enough to the 2.15–2.17 hPa mean depth found by Flocas et al. (2010) within the eastern Mediterranean region. Also, the values extending from 3.2 to 5.4° lat concern 80 % of the cyclones' radius and the corresponding mean is 4.4° lat. This is in great agreement with Trigo et al. (1999) who found the average cyclone radius to be approximately 4.5° lat (or 500 km) in the Aegean region in winter and spring. Generally, the radius of Mediterranean cyclones is considerably smaller than that of Atlantic synoptic systems which reach 18° (Lionello et al., 2006). Lastly, the majority of propagation velocity values are between 0.5 and 4.5 m s⁻¹, with a mean of 2.8 m s⁻¹. The propagation velocity range in which most cyclones appear near in the domain includes 3.6–3.9 m s⁻¹, characterizing eastern Mediterranean cyclones according to Flocas et al. (2010).

4.4 Cyclone–rain coincidence for Crete island: cyclone characteristics

In this section, we give a statistical overview of the cyclone characteristics for the cyclone systems associated with precipitation events in the island of Crete. Figure 7 demonstrates

pressure, intensity, depth, radius and propagation velocity of the cyclonic centers in box-and-whisker plots. The diagram of each characteristic shows the main statistical properties for every rain category (x axis) and every season (background color band). The statistical significance of these characteristics is checked pair-wise for the different rain categories and seasons, and the results are presented in detail in Tables 3 and 4, respectively. For the majority of pairs, the differences between the populations of the characteristics are found to be significant. An analysis for every cyclone feature follows, according to Fig. 7.

The pressure diagram of Fig. 7 shows pressure decrease of the cyclone centers with the increase of precipitation. The lowest pressure values are observed in spring and the highest in autumn. The distribution of autumn pressures exhibits the smallest variations and winter the largest, and this is the case for all cyclone center features. Also, for all seasons, variability is smallest for heavy rain events. According to Table 3, pressure differences are statistically significant in all rain categories except in strong–heavy events which have significant differences in pressure only in spring. Concerning the different seasons, winter strong and heavy events' pressures do not have significant differences compared to annual pressures. Table 4 shows that the differences observed between the cyclone pressures for all the other seasons are significant.

The cyclone intensity for the different seasons and rain categories is also demonstrated in Fig. 7. It appears from the graph that intense rain is associated with cyclones of greater intensity. In addition, the highest intensities are ob-

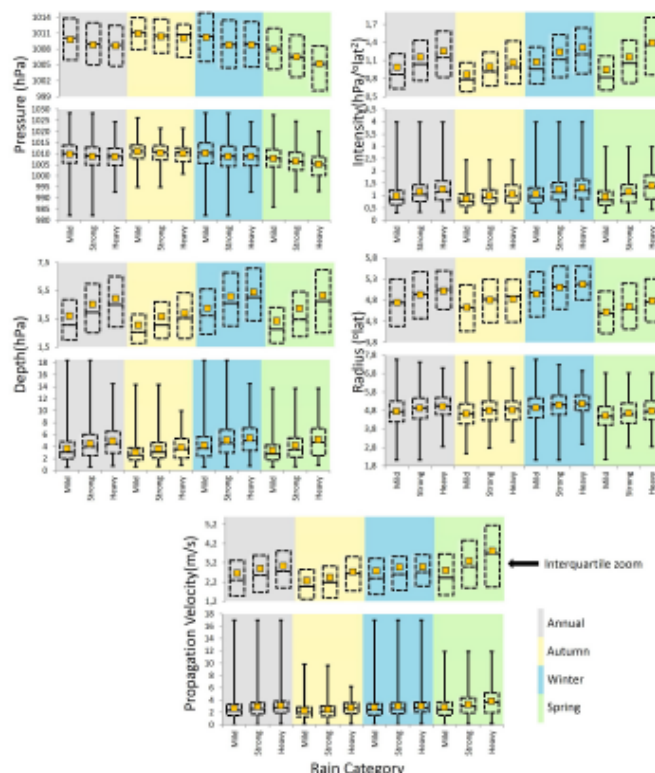


Figure 7. Seasonal and annual analysis of the basic characteristics of the cyclones triggering precipitation events over Crete island for the period 1979–2011, in box-and-whisker format.

served for winter and the lowest for autumn. Only for heavy rain events, for the majority of cases, cyclones are more intense in spring. Likewise, the depth of cyclonic centers associated with precipitation events shows an increasing magnitude with increasing rain intensity. This is expected, taking into consideration that cyclone depth is considered to be a very satisfying measure for cyclone influence (Simmonds and Keay, 2000). The values of cyclonic depth are higher in the winter period, followed by spring and autumn. Generally, both intensity and depth have statistical significant differences for the rain categories and seasons, except for a few cases which are not statistically significant. The corresponding results are presented in Tables 3 and 4.

According to Fig. 7, increasing magnitude is observed for the radius of the cyclones affecting Crete. This is more evident for mild and strong rain. The radii of cyclones associated with heavy rain have negligible differences to those associated with strong rain, especially in autumn which is also not statistically significant in contrast to the other seasons. Also, greater radius values are observed for winter cyclones, followed by autumn and spring.

The last graph of Fig. 7 shows the cyclone propagation velocity. The propagation velocity of cyclones increases with the rain intensity. Thus, greater propagation velocity is observed for heavy rain compared to the other two rain categories. Additionally, higher cyclone velocities are observed in spring compared to the other seasons. The differences of propagation velocity for the rain categories are significant according to Table 3. Also, as shown in Table 4, statistically significant differences are found for the majority of propagation velocity seasonal pairs.

The characteristics of the cyclone centers whose appearance is associated with rain events in the island of Crete are presented in Fig. 8. In particular, the first column shows the average values of the characteristics for all three rain categories and the second column shows the average value for cyclone centers associated with heavy rain events. In order to identify possible patterns and trends in cyclone characteristics, the cyclone centers are considered according to their relative position to Crete (sectors as presented in Fig. 1).

For both average and heavy rain, the lowest pressures are observed in spring, followed by winter and autumn for

Table 3. Statistical significance results for the characteristics of “affecting” cyclones concerning the different rain categories. The statistical significant differences at 5 % significant level are denoted by 1. The zero values denoted in bold font are those not significant in neither 1, 5 nor 10 % significant levels and zero values which were not noted are significant at 10 % significant level.

Season	Mild-strong	Mild-heavy	Strong-heavy
Pressure			
Annual	1	1	0
Autumn	1	1	0
Winter	1	1	0
Spring	1	1	1
Intensity			
Annual	1	1	1
Autumn	1	1	0
Winter	1	1	1
Spring	1	1	1
Depth			
Annual	1	1	1
Autumn	1	1	0
Winter	1	1	1
Spring	1	1	1
Radius			
Annual	1	1	1
Autumn	1	1	0
Winter	1	1	1
Spring	0	1	0
Propagation velocity			
Annual	1	1	1
Autumn	1	1	1
Winter	1	1	0
Spring	1	1	1

all sectors. Generally, cyclones associated with heavy rain events demonstrate lower pressures than the average pressure. The different sectors have negligible variations, except for the west sector which has the greatest pressures for both average and heavy rain in autumn and the lowest pressures in spring. This is more profound in heavy rain cases. Also, the north (N, NE, NW) cyclone centers have lower pressures than the south ones (S, SE, SW).

Cyclone intensity and depth seem to show similar behavior which is justified because depth is proportional to intensity (Simmonds and Keay, 2000). The lowest values are observed in autumn and the highest for winter and spring. Additionally, both intensities and depths are greater for heavy rain events. Annually, the west sector is found to have the greatest intensity and depth. Winter and spring are in agreement with this behavior, with the exception of autumn which has

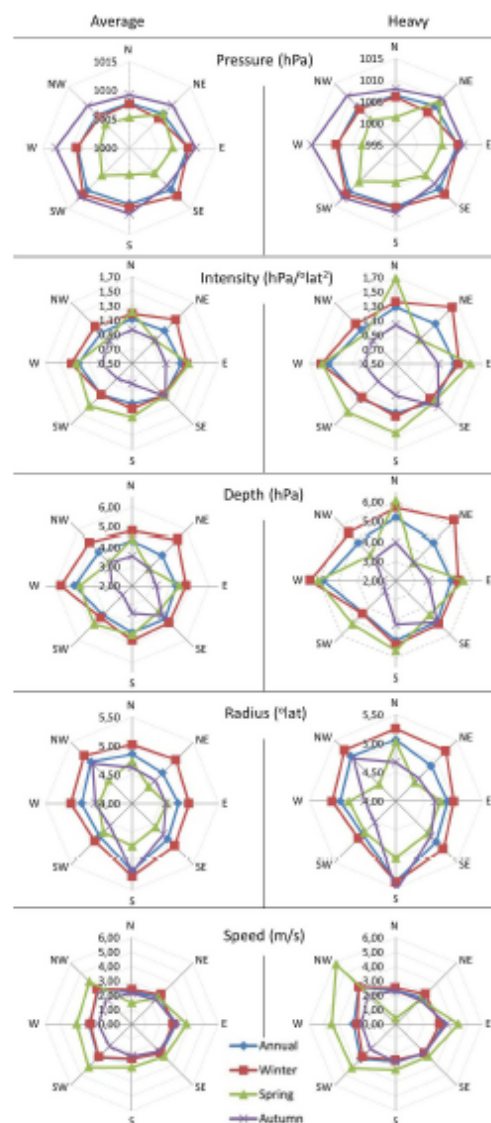


Figure 8. Seasonal and annual analysis of the basic characteristics of the cyclones triggering precipitation events over Crete island for the period 1979–2011. The left column represents the average for all rain events and the right column only represents heavy precipitation events.

its greatest values in intensity and depth for the southeast sector.

The cyclone radius is greater in winter and in most of the cases, it has greater values for heavy rain in contrast to the average. Also, its lowest values are observed in autumn (west sector) and spring (northwest and northeast sector).

Table 4. Statistical significance results for the characteristics of “affecting” cyclones concerning the different seasons. The statistical significant differences at 5 % significant level are denoted by 1. The zero values denoted in bold font are those not significant in neither 1, 5 nor 10 % significant level and zero values which were not noted are significant at 10 % significant level.

Rain category	Winter-spring	Winter-autumn	Winter-annual	Spring-autumn	Spring-annual	Autumn-annual
Pressure						
Mild	1	1	1	1	1	1
Strong	1	1	0	1	1	1
Heavy	1	1	0	1	1	1
Intensity						
Mild	1	1	1	1	1	1
Strong	1	1	1	1	0	1
Heavy	0	1	0	1	1	1
Depth						
Mild	1	1	1	1	1	1
Strong	1	1	1	1	1	1
Heavy	1	1	1	1	0	1
Radius						
Mild	1	1	1	1	1	1
Strong	1	1	1	1	1	1
Heavy	1	1	1	0	1	1
Propagation velocity						
Mild	0	1	1	1	1	1
Strong	1	1	0	1	1	1
Heavy	1	0	0	1	1	0

The greatest radius magnitudes for all seasons are observed in the south sector.

The last cyclone characteristic presented in Fig. 8 concerns cyclone propagation velocity which demonstrates its greatest values in spring and lowest in autumn for the majority of cases. Also, the north sector has the lowest propagation velocity values compared to the other sectors and NW, W, SW sectors have the greatest. Additionally the cyclone propagation velocity is greater for heavy rain rather than the average case.

The results depicted in Fig. 8 provide an insight into location-specific characteristics of the cyclones associated with precipitation events in Crete. In most cases, the cyclone characteristics per sector presented in Fig. 8 confirm the general behavior of the cyclone characteristics demonstrated in Fig. 7. Generally, seasonal differences among the sectors are observed as well as extreme values for heavy rain events. Concerning the defined sectors, the west sector stands out demonstrating the lowest and highest values for the majority of cyclone characteristics in spring and autumn which is more profound in heavy rain case. Also, spring cyclone centers located in the north sector are distinguished for the low pressure and propagation velocity values as well as intensity,

depth and radius magnitudes which are considerably high, compared to the other sectors.

5 Conclusions

In this work the main characteristics of cyclones associated with precipitation events in Crete have been explored for a 30 year period (1979–2011). The identification, tracking and feature definition of the cyclones was accomplished with the aid of the Melbourne University algorithm (MS scheme). This analysis allows us to better understand the behavior of atmospheric systems related to rainfall situations introducing a step-by-step methodology for the association of cyclones with rain. In addition, although of a local nature, the study is of great interest, since Crete has a key location in the eastern Mediterranean basin.

It was found that for the majority of strong and heavy rain events, cyclones were detected nearby Crete and that the season of the greatest coincidence between rain and cyclones is spring, followed by winter and autumn. In addition, it was verified that cyclones affecting Crete mainly originate from the northwest, followed by the southwest. Passing from mild to heavy rain events, the proportional difference between the origination of the associated cyclone percentages is getting

smaller. Also, the cyclone centers north of Crete were the main triggering mechanisms of mild and strong rain events, followed by those located in the south. This still applies for events of greater rainfall, although the difference is slighter and especially in spring, the majority of heavy rain events are caused by southern cyclone centers.

The distribution of the values of the cyclone characteristics is normal for pressure and radius and left skewed for the rest of the characteristics. Moreover, increasing or decreasing trends can be distinguished for the characteristics of the cyclones associated with rainfall. A negative trend is observed for pressure, and positive trends for intensity, depth, radius and propagation velocity with rain increase. Seasonally, spring cyclones are more prone to lower pressures and greater cyclone propagation velocity, while winter cyclones yield greater intensity, depth and radius. This behavior applies for the majority of the sectors considered around Crete, with some variations.

This study examines the characteristics of the cyclones associated with rainfall events in Crete. To the best of our knowledge, this is the first attempt to relate the characteristics of the cyclones such as pressure, depth and radius to rain intensity. Although cyclones have been extensively studied for their climatology, topology, frequency (Flocas et al., 2010; Neu et al., 2013) and also their relation to physical phenomena like rain and wind (Catto et al., 2012; Hawcroft et al., 2012), this is the first time the relationship of their characteristics to the intensity of the rain events is investigated. This methodology was recently applied for the construction of a rain prediction model (Iordanidou et al., 2014) providing information that can be valuable and supplementary for forecasting purposes. Individually or in association with additional information, the development of a basic warning system for the management and mitigation of flood events can be achieved. Further analysis of the cyclonic tracks and characteristics projected by climate models can provide valuable information for the impact of global change on the atmospheric systems in the wider eastern Mediterranean.

Acknowledgements. We thank I. Simmonds from the University of Melbourne who kindly provided the cyclone tracking algorithm. We are grateful to Helena Flocas and the members of her group from the National and Kapodistrian University of Athens for providing valuable guidance through the application process. V. Iordanidou and I. K. Tsanis were supported during the revisions by the “ARISTEIA II” Action (“REINFORCE” program) of the “Operational Education and Lifelong Learning programme” and are co-funded by the European Social Fund (ESF) and National Resources.

Edited by: G. Panegrossi

Reviewed by: three anonymous referees

References

- Bartholy, J., Pongrácz, R., and Pattantyús-Ábrahám, M.: Analyzing the genesis, intensity, and tracks of western Mediterranean cyclones, *Theor. Appl. Climatol.*, 96, 133–144, doi:10.1007/s00704-008-0082-9, 2008.
- Catto, J. L., Jakob, C., Berry, G., and Nicholls, N.: Relating global precipitation to atmospheric fronts, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L10805, doi:10.1029/2012GL051736, 2012.
- Chartzoulakis, K. and Psarras, G.: Global change effects on crop photosynthesis and production in Mediterranean: the case of Crete, Greece, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 106, 147–157, doi:10.1016/j.agee.2004.10.004, 2005.
- Claud, C., Alhammoud, B., Funatsu, B. M., and Chaboureaud, J.-P.: Mediterranean hurricanes: large-scale environment and convective and precipitating areas from satellite microwave observations, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 2199–2213, doi:10.5194/nhess-10-2199-2010, 2010.
- Flaounas, E., Raveh-Rubin, S., Wernli, H., Drobinski, P., and Bastin, S.: The dynamical structure of intense Mediterranean cyclones, *Clim. Dynam.*, 44, 2411–2427, doi:10.1007/s00382-014-2330-2, 2014.
- Flocas, H. A., Simmonds, I., Kouroutzoglou, J., Keay, K., Hatzaki, M., Bricolas, V., and Asimakopoulou, D.: On Cyclonic Tracks over the Eastern Mediterranean, *J. Climate*, 23, 5243–5257, doi:10.1175/2010JCLI3426.1, 2010.
- Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., Blaškovičová, L., Blöschl, G., Borga, M., Dumitrescu, A., Daliakopoulos, I., Garcia, J., Irimescu, A., Kohnova, S., Koutroulis, A., Marchi, L., Matreata, S., Medina, V., Preciso, E., Sempere-Torres, D., Stancalie, G., Szolgay, J., Tsanis, I., Velasco, D., and Viglione, A.: A compilation of data on European flash floods, *J. Hydrol.*, 367, 70–78, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.12.028, 2009.
- Grillakis, M. G. and Tsanis, I. K.: Integrated flash flood analysis in ungauged watersheds, in 12th Plinius Conference on Mediterranean Storms, vol. 12, Plinius Conference Abstracts, Corfu Island Greece, p. 18, 2010.
- Hawcroft, M. K., Shaffrey, L. C., Hodges, K. I., and Dacre, H. F.: How much Northern Hemisphere precipitation is associated with extratropical cyclones?, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L24809, doi:10.1029/2012GL053866, 2012.
- Iordanidou, V., Koutroulis, A. G., and Tsanis, I. K.: A Probabilistic Rain Diagnostic Model Based on Cyclone Statistical Analysis, *Adv. Meteorol.*, 2014, 498020, doi:10.1155/2014/498020, 2014.
- Jansa, A., Buzzi, A., and Arbogast, P.: MEDEX, cyclones that produce high impact weather in the Mediterranean, available at: <http://medex.imm.uib.es> (last access: 18 September 2014), 2001a.
- Jansa, A., Genoves, A., Picornell, M. A., Campins, J., Riosalido, R., and Carretero, O.: Western Mediterranean cyclones and heavy rain. Part 2: Statistical approach, *Meteorol. Appl.*, 8, 43–56, doi:10.1017/S1350482701001049, 2001b.
- Karagiannidis, A., Karacostas, T., Maheras, P., and Makrogiannis, T.: Trends and seasonality of extreme precipitation characteristics related to mid-latitude cyclones in Europe, *Adv. Geosci.*, 20, 39–43, doi:10.5194/adgeo-20-39-2009, 2009.
- Kouroutzoglou, J., Flocas, H. A., Keay, K., Simmonds, I., and Hatzaki, M.: Climatological aspects of explosive cyclones in the Mediterranean, *Int. J. Climatol.*, 31, 1785–1802, doi:10.1002/joc.2203, 2011a.

- Kouroutzoglou, J., Flocas, H., Simmonds, I., Keay, K., and Hatzaki, M.: Assessing characteristics of Mediterranean explosive cyclones for different data resolution, *Theor. Appl. Climatol.*, 105, 263–275, doi:10.1007/s00704-010-0390-8, 2011b.
- Kouroutzoglou, J., Flocas, H. A., Keay, K., Simmonds, I., and Hatzaki, M.: On the vertical structure of Mediterranean explosive cyclones, *Theor. Appl. Climatol.*, 110, 155–176, doi:10.1007/s00704-012-0620-3, 2012.
- Koutroulis, A. G. and Tsanis, I. K.: A method for estimating flash flood peak discharge in a poorly gauged basin: Case study for the 13–14 January 1994 flood, Giofiro basin, Crete, Greece, *J. Hydrol.*, 385, 150–164, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.02.012, 2010.
- Koutroulis, A. G., Tsanis, I. K., and Daliakopoulos, I. N.: Seasonality of floods and their hydrometeorologic characteristics in the island of Crete, *J. Hydrol.*, 394, 90–100, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.04.025, 2010.
- Leonard, S. R., Turner, J., and Wal, A. Van Der: An assessment of three automatic depression tracking schemes, *Meteorol. Appl.*, 6, 173–183, 1999.
- Lim, E. and Simmonds, I.: Southern Hemisphere winter extratropical cyclone characteristics and vertical organization observed with the ERA-40 data in 1979–2001, *J. Climate*, 20, 2675–2690, doi:10.1175/JCLI4135.1, 2007.
- Lionello, P., Bhand, J., Buzzi, A., Della-Marta, P. M., Krichak, S. O., Jansa, A., Maheras, P., Sanna, A., Trigo, I. F., and Trigo, R.: Cyclones in the Mediterranean Region: Climatology and Effects on the Environment, in: *Mediterranean Climate Variability*, Amsterdam, 325–372, 2006.
- Maheras, P., Flocas, H. A., Patrikas, I., and Anagnostopoulou, C.: A 40 year objective climatology of surface cyclones in the Mediterranean region: spatial and temporal distribution, *Int. J. Climatol.*, 21, 109–130, doi:10.1002/joc.599, 2001.
- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., and Gaume, E.: Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management, *J. Hydrol.*, 394, 118–133, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.07.017, 2010.
- Miglietta, M. M., Laviola, S., Malvaldi, A., Conte, D., Levizzani, V., and Price, C.: Analysis of tropical-like cyclones over the Mediterranean Sea through a combined modeling and satellite approach, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 2400–2405, doi:10.1002/grl.50432, 2013.
- Murray, R. J. and Simmonds, I.: A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part I: development and operation of the scheme, *Aust. Meteorol. Mag.*, 39, 155–166, 1991.
- Naoum, S. and Tsanis, I. K.: Temporal and spatial variation of annual rainfall on the island of Crete, Greece, *Hydrol. Process.*, 17, 1899–1922, doi:10.1002/hyp.1217, 2003.
- Neu, U., Akperov, M. G., Bellenbaum, N., Benestad, R., Blender, R., Caballero, R., Cocozza, A., Dacre, H. F., Feng, Y., Friedrich, K., Grieger, J., Gulev, S., Hanley, J., Hewson, T., Inatsu, M., Keay, K., Kew, S. F., Kindem, I., Leckebusch, G. C., Liberato, M. L. R., Lionello, P., Mokhov, I. I., Pinto, J. G., Raible, C. C., Reale, M., Rudeva, I., Schuster, M., Simmonds, I., Sinclair, M., Sprenger, M., Tilinina, N. D., Trigo, I. F., Ulbrich, S., Ulbrich, U., Wang, X. L., and Wernli, H.: IMILAST: A Community Effort to Intercompare Extratropical Cyclone Detection and Tracking Algorithms, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 94, 529–547, doi:10.1175/BAMS-D-11-00154.1, 2013.
- Simmonds, I. and Keay, K.: Mean Southern Hemisphere Extratropical Cyclone Behavior in the 40-Year NCEP–NCAR Reanalysis, *J. Climate*, 13, 873–885, 2000.
- Simmonds, I. and Murray, R. J.: Southern Extratropical Cyclone Behavior in ECMWF Analyses during the FROST Special Observing Periods, *Weather Forecast.*, 14, 878–891, 1999.
- Trigo, I. F., Davies, T. D., and Bigg, G. R.: Objective Climatology of Cyclones in the Mediterranean Region, *J. Climate*, 12, 1685–1696, 1999.
- Tsanis, I. K., Koutroulis, A., Daliakopoulos, I., and Michaelides, S.: Storm analysis and precipitation distribution of the flash flood in Almyrida basin, Crete, *Geophys. Res. Abstr.*, 10, EGU2008-A-09498, EGU General Assembly 2008, Vienna, Austria, 2008.
- Tsanis, I. K., Koutroulis, A. G., Flocas, H. A., Kaminari, M., Kouroutzoglou, J., and Simmonds, I.: Atmospheric circulation patterns associated with flood events in Crete, Greece, in: *Protection and restoration of the environment*, Thessaloniki, Greece, 1842–1852, 2012.
- Tsanis, I. K., Seiradakis, K. D., Daliakopoulos, I. N., Grillakis, M. G., and Koutroulis, A. G.: Assessment of GeoEye-1 stereo-pair-generated DEM in flood mapping of an ungauged basin, *J. Hydroinformatics*, 16, 1–18, doi:10.2166/hydro.2013.197, 2013.
- Ulbrich, U., Brucher, T., Fink, A., Leckebusch, G. C., Kruger, A., and Pinto, J. G.: The central European floods of August 2002? Part 1 – Rainfall periods and flood development, *Weather*, 58, 371–377, 2003.
- Ulbrich, U., Leckebusch, G. C., and Pinto, J. G.: Extra-tropical cyclones in the present and future climate: a review, *Theor. Appl. Climatol.*, 96, 117–131, doi:10.1007/s00704-008-0083-8, 2009.
- Vrochidou, A.-E. K. and Tsanis, I. K.: Assessing precipitation distribution impacts on droughts on the island of Crete, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 1159–1171, doi:10.5194/nhess-12-1159-2012, 2012.

Research Article

A Probabilistic Rain Diagnostic Model Based on Cyclone Statistical Analysis

V. Iordanidou,¹ A. G. Koutroulis,¹ and I. K. Tsanis^{1,2}

¹Department of Environmental Engineering, Technical University of Crete, 73100 Chania, Greece

²Department of Civil Engineering, McMaster University, Hamilton, ON, Canada L8S 4L7

Correspondence should be addressed to I. K. Tsanis; tsanis@hydromech.gr

Received 13 March 2014; Accepted 23 May 2014; Published 11 June 2014

Academic Editor: Hiroyuki Hashiguchi

Copyright © 2014 V. Iordanidou et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Data from a dense network of 69 daily precipitation gauges over the island of Crete and cyclone climatological analysis over middle-eastern Mediterranean are combined in a statistical approach to develop a rain diagnostic model. Regarding the dataset, 0.5×0.5 , 33-year (1979–2011) European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) reanalysis (ERA-Interim) is used. The cyclone tracks and their characteristics are identified with the aid of Melbourne University algorithm (MS scheme). The region of interest is divided into a grid mesh and for each grid the probability of rain occurrence from passing cyclones is estimated. Such probability maps are estimated for three rain intensity categories. The probability maps are evaluated for random partitions of the data as well as for selected rain periods. Cyclones passing south of Italy are found to have greater probability of producing light rain events in Crete in contrast to medium and heavy rain events which are mostly triggered by cyclones of southern trajectories. The performance of the probability maps is very satisfactory, recognizing the majority of “affecting” cyclones and rejecting most cyclones that do not trigger rain events. Statistical measures of sensitivity and specificity range between 0.5 and 0.8 resulting in effective forecasting potential.

1. Introduction

The growth of popularity, tourism, and industry in the Mediterranean region increases its sensitivity to the impact of natural disasters such as floods and landslides [1, 2]. In addition, the complex topography of the Mediterranean region characterized by its orography and coastlines is vulnerable to cyclone formation or “cyclogenesis” [3–5]. Cyclones and rainfall are strongly associated [1, 6] especially in the Mediterranean where they have a great contribution in organizing the low-level flow and moisture and as such feeding the precipitation systems [2, 7].

It has been subject of numerous researchers to analyze the relationship of rain with cyclones in the Mediterranean region. The majority of studies agree that cyclones’ attributes and frequency influence precipitation regime. Both Hawcroft et al. [8] and Catto et al. [9] agree that most of the total precipitation in the northern hemisphere is triggered by

extratropical cyclones. The same verification holds for the south hemisphere according to Papritz et al. [10] who found that 60%–90% of “strong” precipitation is triggered by those systems. Extreme rainfall is also connected with cyclonic circulation patterns. Jansa et al. [11] found that heavy rain events (>60 mm/day) gauged in different Mediterranean sites are associated with cyclones’ appearance in the wider area. In addition, Reale and Lionello [2] observed that there is a higher probability to detect a cyclone within a distance of 20° (about 2000 km) for intense precipitation events at 15 Mediterranean coastal locations. The Mediterranean rainfall decrease especially during the winter is found to be related with cyclones’ frequency decline [12]. Changes in cyclonic circulation patterns also are responsible for precipitation amount and occurrence according to an analysis over the Greek territory [13]. In addition, regarding future climate scenarios, changes of precipitation are consistent with changes in cyclonic activity [5, 14].

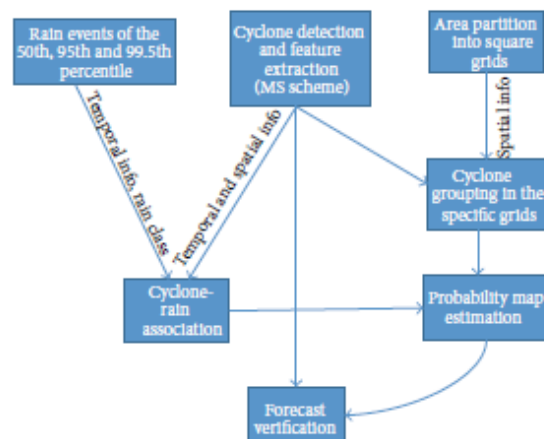


FIGURE 1: Analysis procedure diagram.

Many algorithms and software packages have been developed for the identification of the cyclones and their tracking. The intercomparison of midlatitude storm diagnostics (IMI-LAST) team has evaluated 15 different algorithms of cyclone identification and tracking for the same dataset and found inconsistencies among the schemes for both reanalysis (ERA-Interim) and model simulations (ECHAM5/OM1) concerning variables such as the number of identified cyclones, cyclone frequency, and life cycle [15, 16].

Being an important driver for precipitation, cyclones have been thoroughly investigated with respect to their lifetime, frequency, evolution, and origin. Campins et al. [7] investigated the climatology of Mediterranean cyclones for a 45-year period (1957–2002) pointing out the gulf of Genoa and Cyprus as two important cyclogenetic regions along with regions in North Africa, the Iberian peninsula, the Aegean sea, and the Algerian sea. In this study seasonal variabilities are identified in agreement with other studies [4, 17–21] noting significant difference in cyclones' frequency. In both Nissen et al. [22] and Flocas et al. [19] a negative trend in western cyclonic systems is identified in contrast to eastern Mediterranean where a small increase can be observed. With regards to cyclone development, Rudeva and Gulev [23] found that for cyclones of the northern hemisphere over the period 1948–2004, cyclone size (radius) is a crucial parameter affecting cyclone lifetime and intensity. In this direction with the aid of MS scheme Simmonds [24] shows how the cyclone radius grows through the life of a cyclone.

Motivated from the fact that precipitation is closely related to cyclone presence and that a great effort has been made for the proper comprehension of the cyclonic systems, this work suggests a simple probabilistic model based on the statistical analysis of cyclones, for rain prediction. Our methodology is based on the estimation of probabilities on a gridded area of analysis concerning the cyclone passages and their association to recorded rain events. The estimated so-called "probability maps" are then used as drivers to give a prediction for a potential rain event. The verification

procedures used here are the measures of sensitivity (referred to as probability of detection in other studies), specificity (also referred as false alarm ratio), and accuracy [25, 26]. The proposed methodology is evaluated on middle-eastern Mediterranean region for the rain events of the island of Crete, Greece.

2. Data and Methodology

The main objective of this work is the estimation of spatial probability maps of cyclones responsible for rain events. In addition, a statistical approach is evaluated for rain events forecasting. The statistical analysis is extended including conditional cyclones characteristics such as cyclone intensity, depth, and radius. Figure 1 presents a brief diagrammatic overview of the procedure. In a nutshell, during the first step of the analysis three independent procedures take place. (a) Rain categories are selected according to specific percentiles (depending on the application, 50th, 95th, and 99.5th in our case), (b) cyclones and their characteristics are recognized with a selected algorithm (MS scheme in this work), and (c) the selected area of interest is partitioned in grid cells of preferred resolution (0.5×0.5 deg. of lat. here). Temporal and spatial information of the cyclones and the area partition are evaluated for the cyclones' grouping and rain-cyclone features are examined to associate the two physical processes. The probability values are computed for each grid cell according to the rain-cyclone association leading to the formation of the respective probability maps. The final step of the analysis concerns rain forecast verification using the cyclone statistics of the probability maps and the original cyclone data.

2.1. Data. In the present analysis we use the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA-Interim reanalysis dataset for the period between 1979 and 2011. The ERA-Interim data are of 6-hour temporal resolution at base times 0000, 0600, 1200, and 1800 UTC and have a regular latitude-longitude with a spatial resolution of $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. The field of mean sea-level pressure (MSLP) is analyzed for the identification of the cyclones' positions and parameters as well as their tracks. Investigated are autumn, winter, and spring covering the months from September to May. Summer period is excluded from the analysis as there is negligible rainfall over Crete. The cyclones are treated as a whole in time and not seasonally grouped which is expected to be investigated in our subsequent work. Seasonality consideration is expected to lead to different results regarding to the fact that the majority of rain events in Crete occur during winter. The domain of study for the detection and identification of the cyclones includes part of the middle-eastern Mediterranean area and extends between 4° – 33° E and 32° – 43° N.

The area of interest according to the rain events is Crete which is enclosed within the domain of 23.4° – 26.4° E and 34.8° – 35.7° N. The domain of study and Crete boundary are shown in Figure 2. Precipitation records in Crete were obtained for 69 daily gauging stations, compiled and quality controlled by the Directorate of Water of the Decentralized

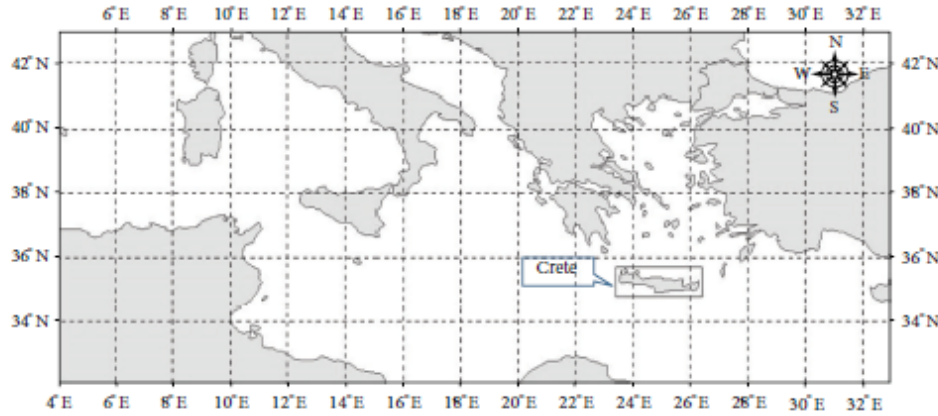


FIGURE 2: The domain of study including part of middle-eastern Mediterranean. Noted is Crete for which rain events are investigated.

Administration of Crete. Flood events affecting Crete are also investigated, selected from several flood events databases (<http://ceogis-floods.web.auth.gr/>) for which more information can be found in [27–29].

2.2. Cyclone Tracking. Cyclones are detected using the Melbourne University finding and tracking scheme (from now on referred to as MS scheme) based on the quasi-Lagrangian perspective [30, 31]. MS scheme works with PMSL fields projected on a polar stereographic grid with the aid of bicubic splines. The identification of possible search areas is achieved by looking for maxima of the pressure gradient, an approach similar to vorticity maxima identification. Thereafter, pressure minima are identified in the selected areas. This strategy gives the advantage of finding both close and open cyclones which is of great importance because cyclones develop during their life cycle. Hence, missing open lows could lead to time series break of a cyclone system. Hope et al. [32] developed a frontal analysis scheme based on MS scheme for the better identification of open cyclone-precipitation association due to the fact that open depressions' identification is of great importance as they are usually associated with rainfall.

Cyclone radius, depth, and intensity are retrieved from MS scheme and are calculated according to the following formulas.

Cyclone radius is estimated as

$$R^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i^2, \quad (1)$$

where r_i is the distance of the radial line from the cyclone center to the points at which the Laplacian of the pressure is zero. N concerns the number of the radial lines drawn for every 20° [30, 33].

The Laplacian of the central pressure $\nabla^2 P$ appropriately describes cyclone intensity [30, 33, 34]. Cyclone depth D is a

measure proportional of pressure gradient and radius given by

$$D = \frac{1}{4} R^2 \nabla^2 P. \quad (2)$$

2.3. Cyclone-Rain Association. The cyclones identified with the aid of MS scheme need to be associated with specific rain events in the region of interest. Cyclone-rain association is achieved with temporal and spatial information analysis of cyclone and rain records.

Two definitions of cyclones state were adopted in terms of their temporal evolution over the domain of the study. From this point on, “*hitting*” cyclones are defined as the cyclones at a specific time-point of their track that at the same time are responsible for rain occurrence over Crete. Thus, “*hitting*” cyclones have both temporal and spatial relation with the recorded rain event, as follows in the description. The second definition characterizes the cyclones that within the track evolution at some subsequent point will affect the area of interest by producing rain and will be referred to as “*affecting*” cyclones. If a cyclone is characterized as “*hitting*” (rain producing) at some point within its track, then at its previous points the same cyclone is an “*affecting*” cyclone, which will eventually trigger a rain event over Crete.

Temporally, cyclone characteristics (like center) are estimated every 6 hours while rain records are daily. Hence, the cyclones between two successive rain recordings are those that potentially trigger the second rain event. According to the 50th, 95th, and 99.5th percentiles of daily rainfall accumulation, rain events are divided in three rain categories of light, medium, and heavy rain, corresponding to 8.5, 47.3, and 106 mm/day, respectively. The rain thresholds used in this study are 10, 50, and 100 mm/day in terms of simplicity, which approximately correspond to the exact values and occur after “dry” records of less than 1mm/day are excluded from the analysis. A rain event is defined when rainfall of more than 1 mm is recorded for at least one of the 69 stations of Crete.

Another important aspect of rainfall-cyclone association is the cyclone center location in relation to the area of interest (Crete). The "sufficient affecting" distance between the cyclone center and this region should be less than the cyclone's radius. A rectangular boundary (Figure 2) enclosing the area of interest is defined and Euclidian distance between the cyclone center and the boundary is estimated and compared to cyclone radius in order to define the specific cyclone as "hitting," and thus practically associated with the recorded rain event over Crete. More complex distance measures are not considered due to inconsistencies of the tracking scheme with regards to the cyclone center location and its radius. Also, distance is not measured directly from the cyclone center to the exact gauging station because cyclone structure is not an exact circle so considering the exact distance could lead to loss of information.

2.4. Spatial Probability Maps. In order to estimate the probability of a cyclone detected within middle-eastern Mediterranean area to trigger rain events in the area of Crete we use a 0.5×0.5 grid mesh. Passing cyclones are assigned to each grid according to their center coordinates (longitude-latitude values compared to the grid's boundaries). Probabilities concern the number of cyclones affecting Crete to the total number of cyclones and are estimated for every cell according to

$$\Pr_{c,rc} = \frac{AC_{c,rc}}{TC_{c,rc}}, \quad (3)$$

where $\Pr_{c,rc}$ is the probability of a cyclone passing over cell c to affect the area of interest with a rc rain category event. AC corresponds to the number of affecting cyclones and TC to the total number of cyclones. Both of these are estimated for every grid and for every rain category.

Another probability measure applied is that of weighted-normalized probability (WNP) which is estimated by multiplying $\Pr_{c,rc}$ with the number of cyclones C . The result is then normalized to range between 0 and 1 over the total number of cells for each rain category:

$$WNP_{c,rc} = \frac{\Pr_{c,rc} * C_{c,rc}}{\max_c (\Pr_{c,rc} * C_{c,rc})}. \quad (4)$$

In addition probability maps are estimated for cyclones having extreme characteristics. The characteristics of depth, intensity, and radius are constrained to be greater than their mean value plus two times their variance which corresponds to 2.3% of the data, considering normal distribution, and even less in distributions of positive skew.

2.5. Forecast Verification. Spatial probability maps are tested with statistical measures of sensitivity, specificity, and accuracy which show the performance of cyclone matching to the rain events. 10-fold cross-validation combined with 100 Monte Carlo simulation results in 1000 different test and train datasets for this testing. More specifically, with 10-fold cross-validation the dataset is randomly grouped in 10 different classes consisting of full cyclone tracks. These 10 experimental

TABLE 1: Types of probability maps.

"NoCri":	Simple probability maps (no extra criteria).
"3Cri":	Simple probability maps complementary to constrained probability maps on depth, radius, and intensity (criteria on cyclone selection).
"WN":	WNP maps.
"WN3Cri":	WNP maps complementary to WNP constrained probability maps on depth, radius, and intensity.
"NoCri + WN":	Simple probability maps complementary to WNP maps.

datasets correspond to 10 experiments that for each one of the classes is used as a test dataset and the remaining 9 as a train dataset. The procedure is repeated 100 times in terms of the well-known Monte Carlo simulation.

The criterion for a cyclone to be considered as "affecting" depends on a probability threshold. If the cyclone center is located in a grid cell whose estimated probability (in the probability map) is higher than the defined threshold, then the cyclone is considered to be an "affecting" cyclone. The threshold is optimized to give the higher values to the three statistical measures of sensitivity, specificity, and accuracy. When more than one probability maps are taken into account to decide the effectiveness of a cyclone, each map has a positive impact on the decision of whether the cyclone affects Crete or not; in other words each map gives a positive "vote." More specifically, if at least one of the maps gives a probability value over the defined threshold (positive vote) then the decision is that the cyclone is an "affective" cyclone that will eventually "hit" Crete. Five different probability maps (simple or combinations) are investigated (Table 1).

Once a cyclone at a specific point of the track is found to be affective according to the estimated probability maps, this track is considered as an affecting pathway that will eventually "hit" Crete. According to whether this decision is true or false, the statistical measures of sensitivity, specificity, and accuracy are estimated, constituting well-known verification procedures [25, 26].

The following terms need to be defined in order to present sensitivity, specificity, and accuracy (Table 2).

Sensitivity measure is given by

$$S = \frac{TP}{P} = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (5)$$

where sensitivity S is the ratio of true positives to all the real positive values, recognized or not as positive. Sensitivity indicates the cyclone probability map's ability to identify rain events. The higher the sensitivity the more cyclones causing rain events are identified.

The formula describing specificity is given by

$$SP = \frac{TN}{N} = \frac{TN}{TN + FP}, \quad (6)$$

where specificity SP is the ratio of true negatives to all the real negative values, recognized or not as negative. Specificity indicates the cyclone probability map's ability to correctly

TABLE 2: Sensitivity, specificity, and accuracy definition terms.

True Positive (TP):	The cyclone produces rain and the test is positive.
False Positive (FP):	The cyclone does not produce rain but the test is positive.
True Negative (TN):	The cyclone does not produce rain and the test is negative.
False Negative (FN):	The cyclone does produce rain but the test is negative.
Positive (P):	Sum of TP and FP.
Negative (N):	Sum of TN and FN.

reject the hypothesis that a cyclone causes a rain event. The higher the specificity the more cyclones not causing rain events are identified.

Lastly, accuracy is given by

$$AC = \frac{TP + TN}{P + N} = \frac{TP + TN}{TN + TP + FP + FN}. \quad (7)$$

So accuracy AC is the ratio of the correct positive and negative choices made from the cyclone probability map to the whole cyclone population.

3. Results/Discussion

3.1. Distribution of Affecting and Hitting Cyclones. The combined number of "hitting" and "affecting" cyclones for the 1979–2011 period is presented in Figure 3. For light rain events the majority of responsible cyclones are located over north Levantine Basin (east of Crete), over the Aegean Sea (north), and over Ionian Sea (northwest) of Crete. For medium and heavy rain events, the related cyclonic activity is found further south. Cyclones causing medium rain are primarily located east of Crete. This is less marked for heavy rain, where cyclones seem to be uniformly distributed around Crete. The number of identified affecting and hitting cyclones are in agreement with the findings of Kouroutzoglou et al., [35] regarding the frequency of explosive events developed in eastern Mediterranean, who also found that that almost 55% of the events occur during winter and no cases in summer, supporting our exclusion of summer period. Obviously, the number of cyclones gets smaller for rain events of greater accumulation, as the majority of rain events are of light rain category (50th–95th percentile) and very few are in medium rain category (99.5th percentile).

The probability of a "hitting" cyclone as well as WNP measure for the 1979–2011 period is illustrated in Figure 4. The probability of a passing cyclone to "hit" Crete is higher when passing south of Crete, which gets more profound for greater rain accumulation. On the other hand, the corresponding weighted probability emphasizes regions east of Crete as "hitting" hotspots. Again here hotspots are moved south of Crete for greater rain accumulations.

The corresponding results for "affecting" cyclones for the same period are presented in Figure 5. As it is expected, "affecting" cyclones are in bigger distance than the "hitting"

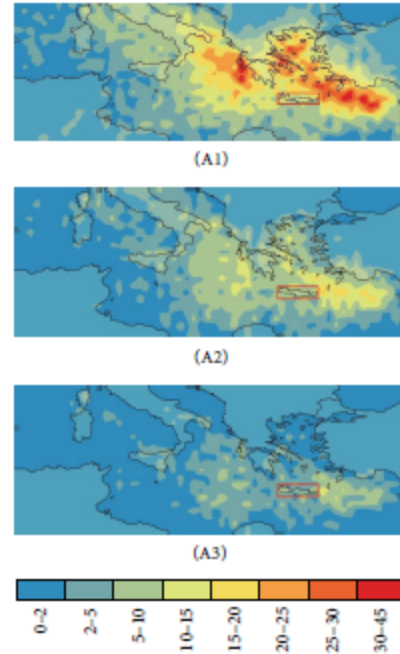


FIGURE 3: Number of "affecting" and "hitting" cyclones for the time period 1979–2011 for (1) light, (2) medium, and (3) heavy rain events.

cyclones. Cyclones passing south of Italy have greater probability of affecting Crete. The "affecting" cyclones' pathways are concentrated southerly, over western Ionian Basin, for medium and especially heavy rain events. For WNP measure, hotspots can be distinguished on the maps as more "location specific" areas. The western Ionian Sea region south of Italy stands out for light rain as an important hotspot, as both the cyclone probability to affect Crete and the number of cyclones (Figure 2) are high in this case. For both medium and heavy rain, hotspots are shifted south and the weighted probabilities are lower compared to the ones of the light rain events. These high probabilities located at the boundaries between central and eastern Mediterranean are in correspondence with the findings of Kouroutzoglou et al. [36] that the upper levels (500 hPa) maximum intensity and size of the explosive cyclones and the maximum geostrophic vorticity at 500 hPa in the Mediterranean are formed at the same area.

Figure 6 illustrates the estimated probability maps for "affecting" cyclones constrained on the extreme values (upper tails) of their depth, radius, and intensity. The regions where "affecting" cyclones have higher probabilities are distributed relevant to those of Figure 5. Probabilities in this case are higher suggesting that cyclones with extreme characteristics are more likely to affect Crete. For light rain a robust pattern of affecting cyclone activity is observed in the wider southern Italy region for all cyclone characteristics' constraints. Heavy rain events are associated with extreme cyclones passing over south Ionian Basin, a finding in great correspondence with the results of Kouroutzoglou et al. [36] that the greater depth

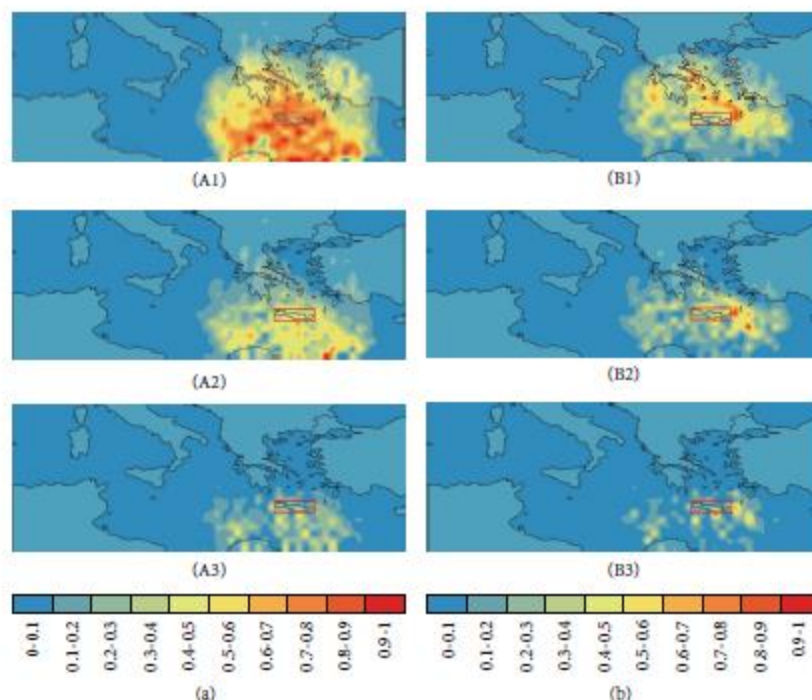


FIGURE 4: Spatial probability maps (a) and weighted-normalized probability maps (WNP) (b) of "hitting" cyclones for the time period 1979–2011 for (1) light, (2) medium, and (3) heavy rain events.

values of surface explosive cyclones are found in the southern Ionian Sea and Gulf of Syrte and western Crete (boundaries between the central and eastern Mediterranean).

3.2. Validation Testing of Probability Maps. The forecasting potentials of the probability maps are tested with random partition of the dataset in testing and training groups. Probability maps are also validated for specific time periods in which flood events are documented in Crete.

Figure 7 presents the validation results, evaluating the probability maps alone or combined for the three rain categories. The probability thresholds are selected to give the optimal results for the three statistical measures of sensitivity, specificity, and accuracy. For the selected probability thresholds, the mean of all probability map methods for each rain category gives results greater than 0.6 for all three statistical measures. When it comes to choose between sensitivity and specificity optimization, sensitivity is preferred to achieve the optimal values (close to one). This is crucial, especially for medium and heavy rain events, because sensitivity represents cyclones identified to affect Crete during their passage. Medium and heavy rain events are important to be forecasted so as to give a proper alarm for potential flooding.

For light rain events, the selected threshold for the probabilities is 0.3. Simple probability map "NoCri" achieves

the best specificity results (0.7) and the lowest sensitivity results (0.56). On the contrary, "NoCri + WN" has the lowest specificity (<0.6) and sensitivity reaches 0.8. The most balanced results are achieved with "WN" and "WN3Cri" in which sensitivity is 0.73 and specificity 0.65. For these probability maps accuracy is also satisfactory reaching 0.67.

The results concerning medium rain are obtained for a 0.2 probability threshold, over which cyclones are considered as "affecting." "NoCri" and "3Cri" favor specificity reaching 0.8 and 0.75 correspondingly. "WN" and "WN3Cri" are those considered most satisfactory giving sensitivity results greater than 0.7 and specificity-accuracy beyond 0.6.

For heavy rain events, the optimal results are obtained for the lowest threshold value (0.1) compared to the other two rain categories. All probability maps give very good results for this threshold. Especially, "3Cri" and "WN3Cri" achieve sensitivity close to 0.8 and specificity-accuracy reaching 0.7.

Generally, satisfactory results are achieved with "WN" for all rain categories. "NoCri" is the stricter one in sensitivity and favors specificity while "NoCri + WN" does the exact opposite, favoring sensitivity. "3Cri" relaxes the probabilities giving higher sensitivity results than "NoCri" and the same holds for "WN3Cri" compared to "WN".

In addition to testing random partitions of data to validate the probability maps forecasting potentials, certain rain periods that correspond to storms leading to flood events

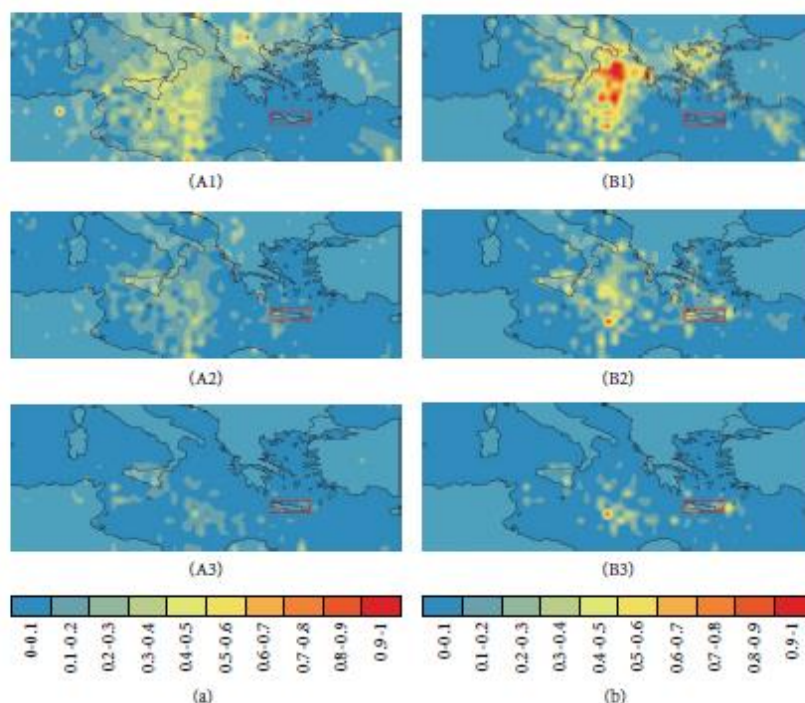


FIGURE 5: Spatial probability maps (a) and weighted-normalized probability maps (WNP) (b) of "affecting" cyclones for the time period 1979–2011 for (1) light, (2) medium, and (3) heavy rain events.

are also tested and the results are presented in Figure 8. In this case, the preselected rain periods are tested with both the global probability thresholds obtained from the random testing and with the optimal thresholds found for the specific events. In both light and heavy rain the results are better for stricter probability thresholds (thresholds higher than those found in random testing) which is expected because in the selected periods the majority of tracks concern "hitting" cyclones. On the contrary, when data partition is random, tracks concerning rain events are much less so in order to "catch" them the probability thresholds have to be relaxed. The relaxed thresholds in this case have very satisfactory results in sensitivity reaching even 0.8 though specificity hardly reaches 0.6 in a few cases. Only for medium rain the thresholds are found to be identical in both random testing and the specified rain periods.

In more detail, for light rain using the global threshold, sensitivity reaches 0.8 with "3Cri" probability map evaluation and sensitivity 0.5. "3Cri" probability map, using 0.5 as probability threshold, approaches 0.7 in sensitivity and 0.8 in specificity. For medium rain events, good results are obtained with all probability maps combinations. However, "NoCri," "3Cri," and "WN" achieve the optimal balance in the statistical measures of interest. Sensitivity reaches and exceeds 0.8 and specificity ranges between 0.6 and 0.8. Finally, very satisfactory results in sensitivity are obtained for heavy rain events outreaching 0.8 for both 0.1 and 0.2 probability

thresholds. For the global threshold (0.1), specificity ranges between 0.5 and 0.6 while the calibrated threshold (0.2) obtains specificity results reaching 0.8.

All in all, global probability thresholds give very satisfactory results in sensitivity though the rain period calibrated thresholds improve specificity. Also, "WN" in all cases obtains outstanding results in the statistical measures. Generally, "NoCri" is the most rigorous probability map giving the lowest sensitivity and highest specificity results and "NoCri + WN" is the most relaxed probability map giving the highest sensitivity and lowest specificity results. The rest of the probability maps give results in-between.

4. Conclusions

In the present study, we have estimated the probabilities of middle-eastern Mediterranean cyclones to affect Crete with rain of specific daily accumulation for the period 1979–2011. Probability maps of simple and weighted probabilities are estimated for the gridded area of study which are thereafter evaluated for their rain forecasting potentials suggesting an alternative rain diagnostic model.

The detection of the cyclones and their tracks as well as cyclone characteristics such as depth, intensity, and radius, is achieved with the application of MS scheme. Cyclones and rain events recorded in the gauging stations are matched

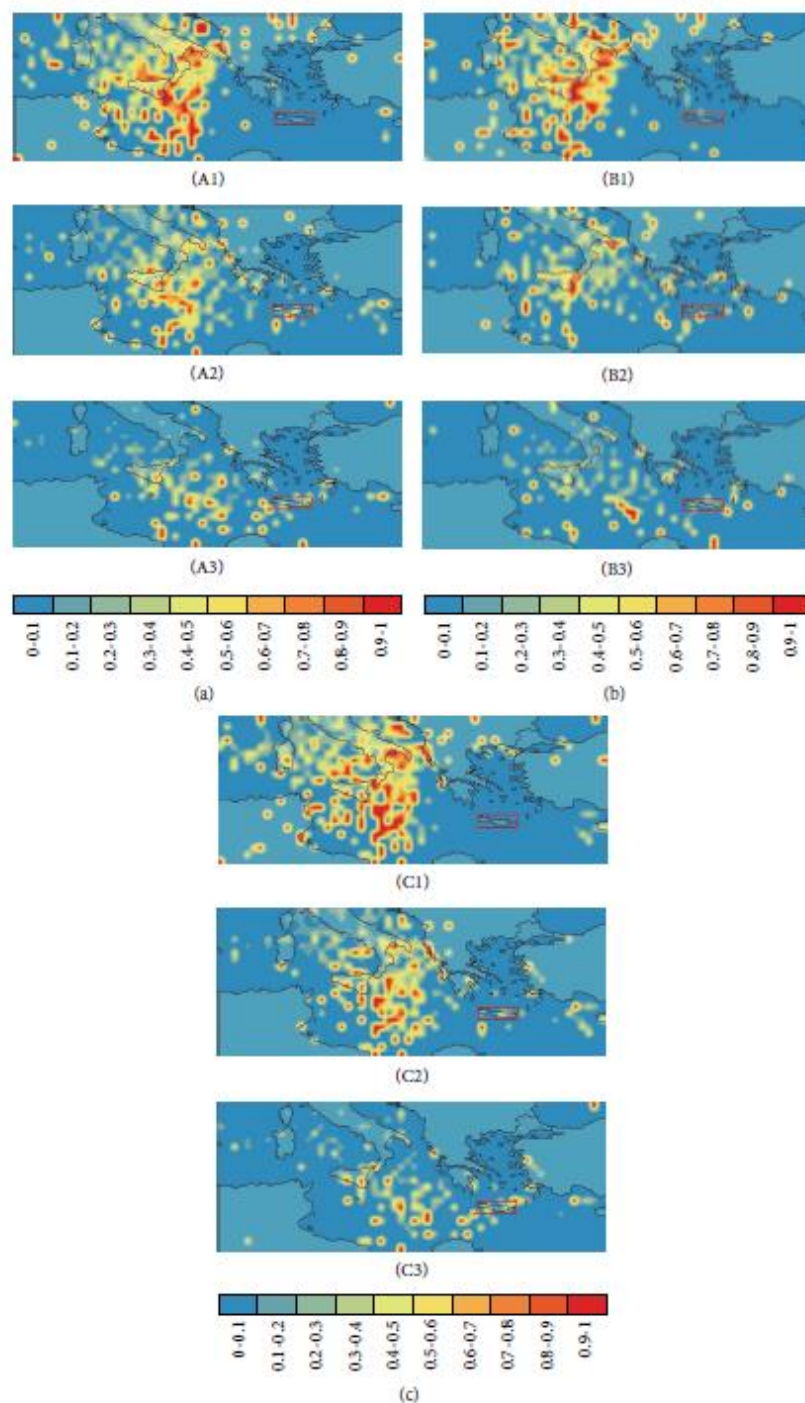


FIGURE 6: Spatial probability maps of "affecting" cyclones for the time period 1979–2011. The cyclones used are constrained on their (a) depth, (b) radius, and (c) intensity for (1) light, (2) medium, and (3) heavy rain events.

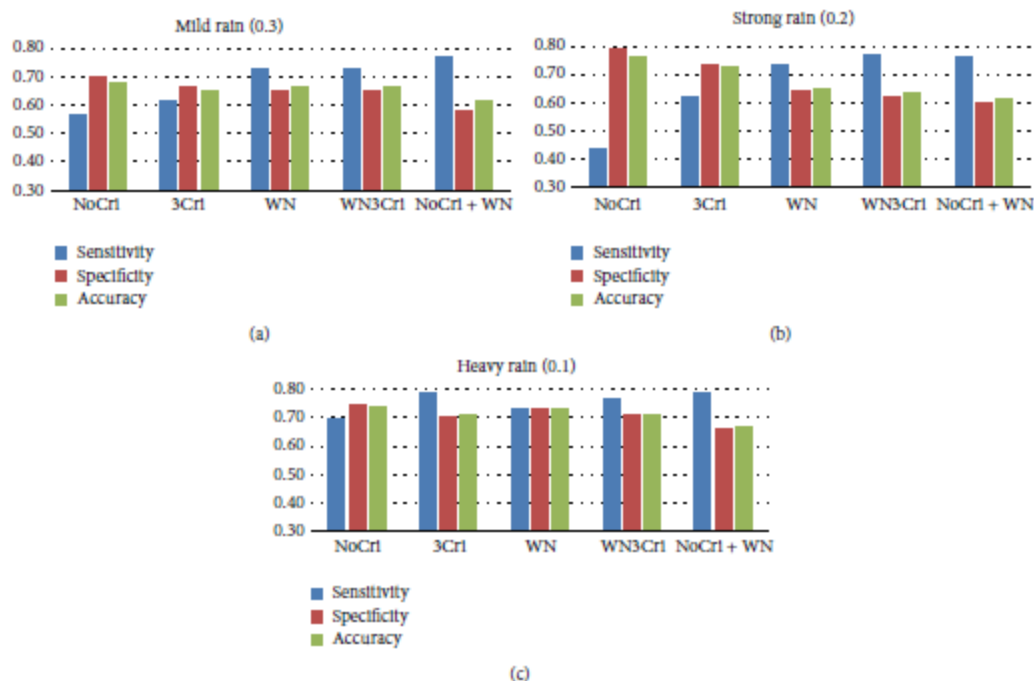


FIGURE 7: Validation results (sensitivity, specificity, and accuracy) for the probability maps alone and in combinations for the three rain categories. In parentheses are the probability thresholds over which a cyclone is grouped as "affecting."

according to cyclone position relative to Crete. The simple and weighted probabilities of cyclones to affect Crete are then estimated according to the number of affecting cyclones over the total number of cyclones for each grid cell. In order to evaluate the probability maps of affecting cyclones, the cyclone dataset is partitioned in random groups of test and train data and with the use of sensitivity, specificity and accuracy measures are investigated their forecasting potentials. The generalization of the forecast verification of the probability maps is achieved via Monte Carlo simulation ($\times 100$) combined with 10-fold cross-validation obtaining a satisfactory number of independent experiments. The probability maps are also evaluated for recorded cases of well-known floods in Crete.

The higher probabilities of affecting cyclones are found south of Italy. Generally, greater daily rain accumulations are triggered by cyclones located in southern regions compared to lower daily rain accumulations. With regards to forecasting verification of the probability maps, sensitivity, specificity, and accuracy measures range between 0.6 and 0.8 for the random experiments. Probability maps are estimated using different probability measures on all cyclones or part of them according to the extreme values of their characteristics (radius, depth, and intensity). The probability maps are evaluated alone or in combination giving very efficient results for the three statistical measures used, in all cases. According

to the probability thresholds selected and how strict (high probability threshold) or relaxed (high probability threshold) they are sensitivity, specificity, and accuracy obtain lower or higher scores. The selected probability thresholds over which a cyclone is characterized as affecting optimize the majority of the statistical measures for the different combinations in the probability maps. A statistical measure of great interest is that of sensitivity, especially for heavy rain events, as it identifies rain events giving a warning for potential hazards. The evaluation of specific flood events in Crete also gives promising results reaching in many cases 0.8 in sensitivity and specificity measures.

The scientific community has made a great effort for the study of cyclone climatology [3–5]. Researchers have proved the strong relation between cyclones appearance and precipitation events [5, 13, 14]. In this study, we make one further step, by evaluating the forecasting potential of cyclonic systems alone with the estimation of simple probabilities of rain occurrence. Results could serve as useful-complementary information when combined with other forecasting tools and methods.

Conflict of Interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this paper.

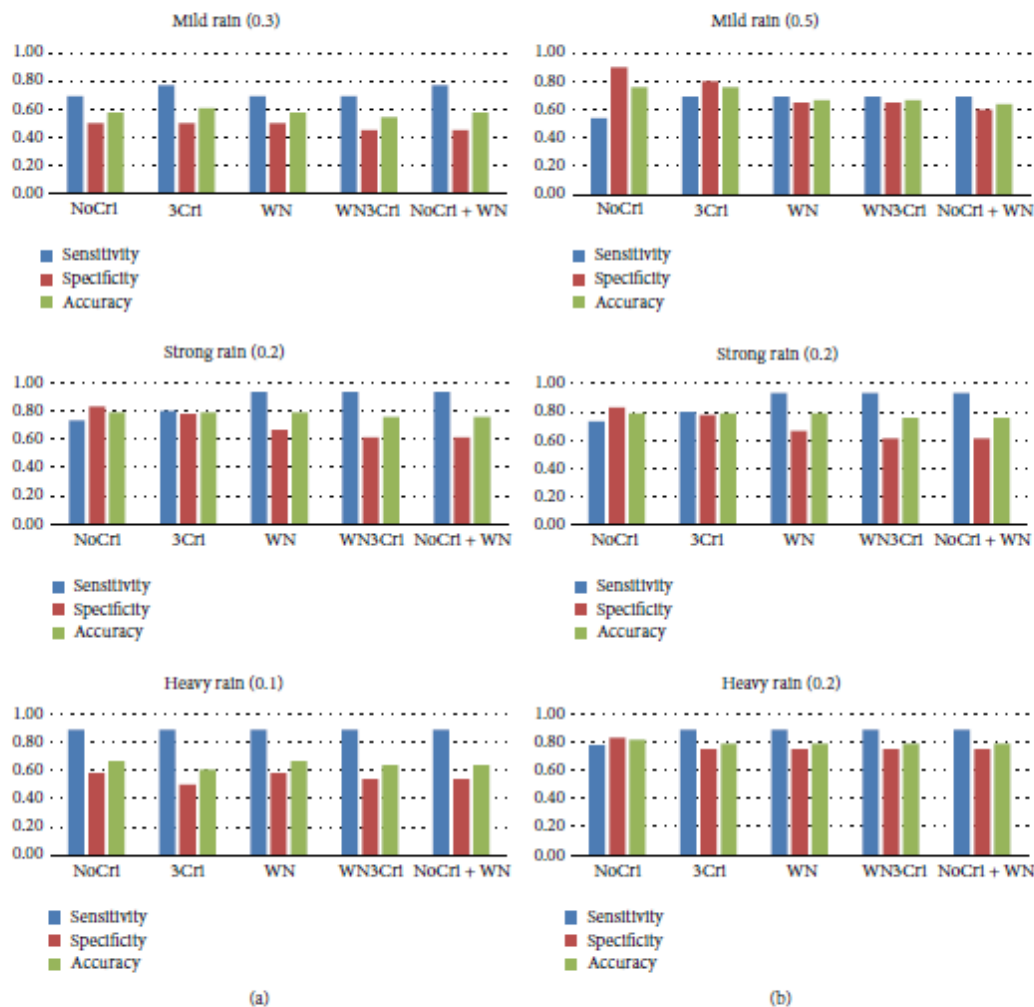


FIGURE 8: Validation results for specific flood events. The first column is for the probability thresholds (in parenthesis) found to have the best validation results in Figure 7 (global thresholds) and the second column is for the thresholds having the best validation results for the specific flood events.

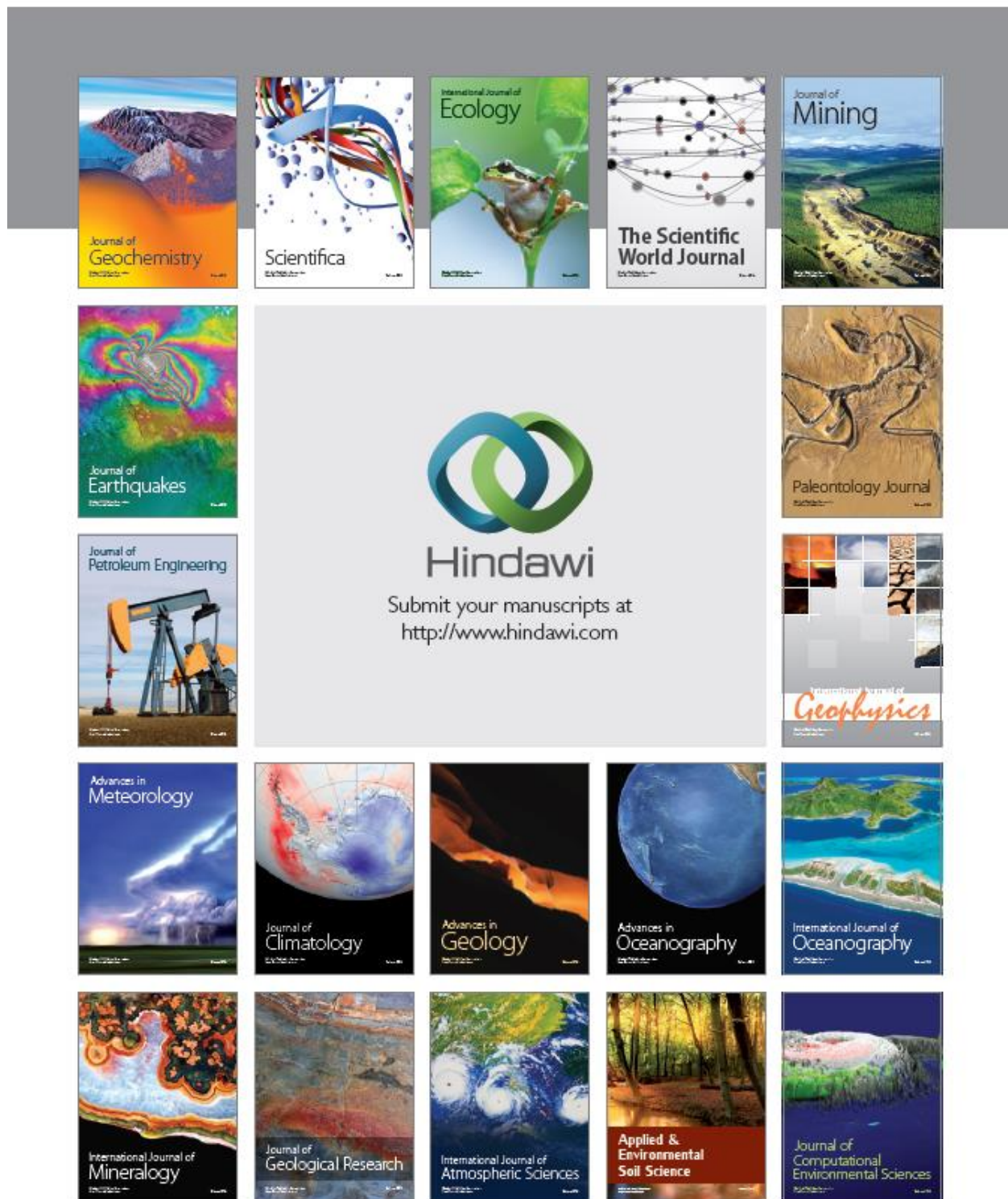
Acknowledgments

The authors thank Dr. I. Simmonds from the University of Melbourne who kindly provided the Cyclone Tracking Algorithm. They are grateful to Professor Helena Flocas and the members of her group from the National and Kapodistrian University of Athens for providing valuable guidance through the application process.

References

- [1] A. Jansa, P. Buzzi A, and P. Arbogast, *MEDEX, Cyclones That Produce High Impact Weather in the Mediterranean*, 2001.
- [2] M. Reale and P. Lionello, "Synoptic climatology of winter intense precipitation events along the Mediterranean coasts," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 13, no. 7, pp. 1707–1722, 2013.
- [3] P. Lionello, J. Bhend, A. Buzzi et al., "Chapter 6 cyclones in the Mediterranean region: climatology and effects on the environment," *Developments in Earth and Environmental Sciences*, vol. 4, pp. 325–372, 2006.
- [4] I. E. Trigo, T. D. Davies, and G. R. Bigg, "Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region," *Journal of Climate*, vol. 12, no. 6, pp. 1685–1696, 1999.
- [5] A. Sanna, P. Lionello, and S. Gualdi, "Coupled atmosphere ocean climate model simulations in the Mediterranean region: effect of a high-resolution marine model on cyclones and

- precipitation," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 13, no. 6, pp. 1567–1577, 2013.
- [6] P. Lionello, J. Bhand, A. Buzzi et al., "Chapter 6 cyclones in the Mediterranean region: climatology and effects on the environment," *Developments in Earth and Environmental Sciences*, pp. 313–358, 2005.
- [7] J. Campins, A. Genovés, M. A. Picornell, and A. Jansà, "Climatology of Mediterranean cyclones using the ERA-40 dataset," *International Journal of Climatology*, vol. 31, no. 11, pp. 1596–1614, 2011.
- [8] M. K. Hawcroft, L. C. Shaffrey, K. I. Hodges, and H. F. Dacre, "How much Northern Hemisphere precipitation is associated with extratropical cyclones?" *Geophysical Research Letters*, vol. 39, no. 24, Article ID L24809, 2012.
- [9] J. L. Catto, C. Jakob, G. Berry, and N. Nicholls, "Relating global precipitation to atmospheric fronts," *Geophysical Research Letters*, vol. 39, no. 10, Article ID L10805, 2012.
- [10] L. Papritz, S. Pfahl, H. Sodemann, H. Wernli, I. Rudeva, and I. Simmonds, "The role of extratropical cyclones and fronts for Southern Ocean freshwater fluxes," *Journal of Climate*. In press.
- [11] A. Jansa, A. Genoves, M. A. Picornell, J. Campins, R. Riosalido, and O. Carretero, "Western Mediterranean cyclones and heavy rain. Part 2: statistical approach," *Meteorological Applications*, vol. 8, no. 1, pp. 43–56, 2001.
- [12] I. F. Trigo, T. D. Davies, and G. R. Bigg, "Decline in Mediterranean rainfall caused by weakening of Mediterranean cyclones," *Geophysical Research Letters*, vol. 27, no. 18, pp. 2913–2916, 2000.
- [13] P. Maheras, K. Tolika, C. Anagnostopoulou, M. Vafiadis, I. Patrikas, and H. Flocas, "On the relationships between circulation types and changes in rainfall variability in Greece," *International Journal of Climatology*, vol. 24, no. 13, pp. 1695–1712, 2004.
- [14] P. Lionello and F. Giorgi, "Winter precipitation and cyclones in the Mediterranean region: Future climate scenarios in a regional simulation," *Advances in Geosciences*, vol. 12, pp. 153–158, 2007.
- [15] U. Neu, M. G. Akperov, N. Bellenbaum et al., "Imilast: a community effort to intercompare extratropical cyclone detection and tracking algorithms," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 94, no. 4, pp. 529–547, 2013.
- [16] U. Ulbrich, G. C. Leckebusch, J. Grieger et al., "Are Greenhouse Gas Signals of Northern Hemisphere winter extra-tropical cyclone activity dependent on the identification and tracking algorithm?" *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 22, no. 1, pp. 61–68, 2013.
- [17] J. Bartholy, R. Pongrácz, and M. Pattantyús-Ábrahám, "Analyzing the genesis, intensity, and tracks of western Mediterranean cyclones," *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 96, no. 1–2, pp. 133–144, 2008.
- [18] H. A. Flocas, I. Simmonds, J. Kouroutzoglou et al., "On cyclonic tracks over the Eastern Mediterranean," *Journal of Climate*, vol. 23, no. 19, pp. 5243–5257, 2010.
- [19] H. A. Flocas, P. Maheras, T. S. Karacostas, I. Patrikas, and C. Anagnostopoulou, "A 40-year climatological study of relative vorticity distribution over the Mediterranean," *International Journal of Climatology*, vol. 21, no. 14, pp. 1759–1778, 2001.
- [20] K. Ammar, M. El-Metwally, M. Almazroui, and M. M. A. Wahab, "A climatological analysis of Saharan cyclones," *Climate Dynamics*.
- [21] A. Hannachi, A. Awad, and K. Ammar, "Climatology and classification of Spring Saharan cyclone tracks," *Climate Dynamics*, vol. 37, no. 3, pp. 473–491, 2011.
- [22] K. M. Nissen, G. C. Leckebusch, J. G. Pinto, D. Renggli, S. Ulbrich, and U. Ulbrich, "Cyclones causing wind storms in the Mediterranean: characteristics, trends and links to large-scale patterns," *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 10, no. 7, pp. 1379–1391, 2010.
- [23] I. Rudeva and S. K. Gulev, "Climatology of cyclone size characteristics and their changes during the cyclone life cycle," *Monthly Weather Review*, vol. 135, no. 7, pp. 2568–2587, 2007.
- [24] I. Simmonds, "Size changes over the life of sea level cyclones in the NCEP reanalysis," *Monthly Weather Review*, vol. 128, no. 12, pp. 4118–4125, 2000.
- [25] J. L. McBride and E. E. Ebert, "Verification of quantitative precipitation forecasts from operational numerical weather prediction models over Australia," *Weather and Forecasting*, vol. 15, no. 1, pp. 103–121, 2000.
- [26] M. Vich, R. Romero, and V. Homar, "Ensemble prediction of Mediterranean high-impact events using potential vorticity perturbations. Part II: adjoint-derived sensitivity zones," *Atmospheric Research*, vol. 102, no. 3, pp. 311–319, 2011.
- [27] A. G. Koutroulis, I. K. Tسانis, and I. N. Daliakopoulos, "Seasonality of floods and their hydrometeorologic characteristics in the island of Crete," *Journal of Hydrology*, vol. 394, no. 1–2, pp. 90–100, 2010.
- [28] A. G. Koutroulis, M. G. Grillakis, I. K. Tسانis, V. Kotroni, and K. Lagouvardos, "Lightning activity, rainfall and flash flooding: occasional or interrelated events? A case study in the island of Crete," *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 12, no. 4, pp. 881–891, 2012.
- [29] A. Mouratidis, G. Doxani, M. Nikolaidou, M. Lampiri, F. Sarti, and M. Tsakiri-Strati, "Contribution of geographical informationsystems and earth observation data to mapping and managing flood events in Greece," *International Journal of Geographical Information Science*. In press.
- [30] R. J. Murray and I. Simmonds, "A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part I: development and operation of the scheme," *Australian Meteorological Magazine*, vol. 39, no. 3, pp. 155–166, 1991.
- [31] R. J. Murray and I. Simmonds, "A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part I: development and operation of the scheme," *Australian Meteorological Magazine*, vol. 39, no. 3, pp. 155–166, 1991.
- [32] P. Hope, K. Keay, M. Pook et al., "A comparison of automated methods of front recognition for climate studies: a case study in Southwest Western Australia," *Monthly Weather Review*, vol. 142, pp. 343–363, 2014.
- [33] E.-P. Lim and I. Simmonds, "Southern hemisphere winter extratropical cyclone characteristics and vertical organization observed with the ERA-40 data in 1979–2001," *Journal of Climate*, vol. 20, no. 11, pp. 2675–2690, 2007.
- [34] I. Simmonds and K. Keay, "Mean southern hemisphere extratropical cyclone behavior in the 40-year NCEP-NCAR reanalysis," *Journal of Climate*, vol. 13, no. 5, pp. 873–885, 2000.
- [35] J. Kouroutzoglou, H. A. Flocas, K. Keay, I. Simmonds, and M. Hatzaki, "Climatological aspects of explosive cyclones in the Mediterranean," *International Journal of Climatology*, vol. 31, no. 12, pp. 1785–1802, 2011.
- [36] J. Kouroutzoglou, H. A. Flocas, K. Keay, I. Simmonds, and M. Hatzaki, "On the vertical structure of Mediterranean explosive cyclones," *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 110, no. 1–2, pp. 155–176, 2012.





Contents lists available at ScienceDirect

Atmospheric Research

journal homepage: www.elsevier.com/locate/atmosres

Investigating the relationship of lightning activity and rainfall: A case study for Crete Island

V. Iordanidou^a, A.G. Koutroulis^a, I.K. Tsanis^{a,b,*}^a School of Environmental Engineering, Technical University of Crete, Chania GR73100, Greece^b Department of Civil Engineering, McMaster University, Hamilton, ON L8S 4L7, Canada

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 September 2015

Received in revised form 9 December 2015

Accepted 26 December 2015

Available online 8 January 2016

Keywords:

Lightning
Precipitation
Clustering
Correlation

ABSTRACT

The relationship of lightning activity and rainfall is investigated for rain events of variable intensity. Rain data from 22 gauging stations over the island of Crete and lightning activity from the Global Lightning Network including both cloud-to-ground and some cloud flashes are analyzed for the period September 2012 to June 2014. Local thunderstorms' characteristics are investigated both individually as well as in groups according to the results of k-means clustering algorithm in 3 dimensions (space (x, y) and time (t)) in which the number of clusters is decided by G-means algorithm. Correlation of non-zero pairs of rain intensity and number of flashes is examined at various time intervals, time lags and effective radii. Also, correlation of flash count within 50 km radius around the stations is examined for the rain events of maximum hourly intensity for each gauging station. The highest coincidence of lightning clusters with intense rain events reaches 60% when gauges are 25–30 km from the cluster center. Maximum correlation within non-zero pairs of rain intensity and flashes number is obtained for more intense rain (99th percentile) and for increased flash count within the searching area (more than 10 flashes). Also, correlation is stronger for shorter time windows. The findings of this study improve the understanding of thunderstorm events and could provide staple information for the improvement of forecasting extreme events.

© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The association of lightning with severe rainfall events has been the subject of many researchers (Koutroulis et al., 2012; Mazarakis et al., 2008; Michaelides et al., 2010; Petrova et al., 2014; Pineda et al., 2007; Siingh et al., 2013). The investigation of physical phenomena related to precipitation is of great importance as extreme rain events constitute high risk natural disasters with negative impact to the socio-economic evolution of modern societies (Reale and Lionello, 2013). Besides, the better understanding of the relationship between lightning and precipitation could improve the holistic perception of thunderstorm events or even the nowcasting of extreme storms (Petrova et al., 2014; Siingh et al., 2014). Scientific focus to the lightning activity is partially due to the fact that many state-of-the-art modern technological systems can capture lightning activity relatively easy and with great accuracy.

Different strategies have been followed for the investigation of the relationship between lightning activity and precipitation mainly studying the association between the flash count and the rain accumulation. Depending on the methodology, the data type and the geographical location of the case study (insular, coastal or continental) results can be completely different (Petrova et al., 2014). Correlations between lightning flashes and rain amount have large variation yielding from

high to very low correlation (Katsanos et al., 2007; Koutroulis et al., 2012; Michaelides et al., 2009). Results vary significantly even for the cases of rain with common origin such as convective rain events alone (Pineda et al., 2007; Siingh et al., 2013, 2014; Soula and Chauzy, 2001) or both stratiform and convective rain events (Koutroulis et al., 2012; Petrova et al., 2014; Yair et al., 2014).

The study of Katsanos et al. (2007) in the area of central and eastern Mediterranean Sea for 6-month period of analysis (from October 2003 up to March 2004) shows that high rain amounts coincide with the appearance of lightning flashes. They showed that more than 50% of rain occurrence higher than 1 mm is related to flashes and only 6% of the rain events with rain higher than 10 mm are not related to flashes. Rain and flashes that were accumulated within 6-hour intervals and lightning were searched in a fixed 0.15° radius around the stations. In the study of Koutroulis et al. (2012) the relationship between intense precipitation and lightning activity over Crete Island for the time period 2008–2009 is investigated, with a special focus in intense flash flood triggering thunderstorms. Correlation of rain accumulation and flash count is examined for different time lags and effective radii giving an average correlation of the order of 0.33. The effective radius giving the higher results in correlation is found to be 15 km around the station and the optimal time lag is achieved when the flash count to is 15 min prior to the rain accumulation. Soula and Chauzy (2001) studied 2 summer events in Paris and found good spatial correlation between lightning and flashes on a grid mesh of variable resolution, reaching a

* Corresponding author at: School of Environmental Engineering, Technical University of Crete, Chania GR73100, Greece.

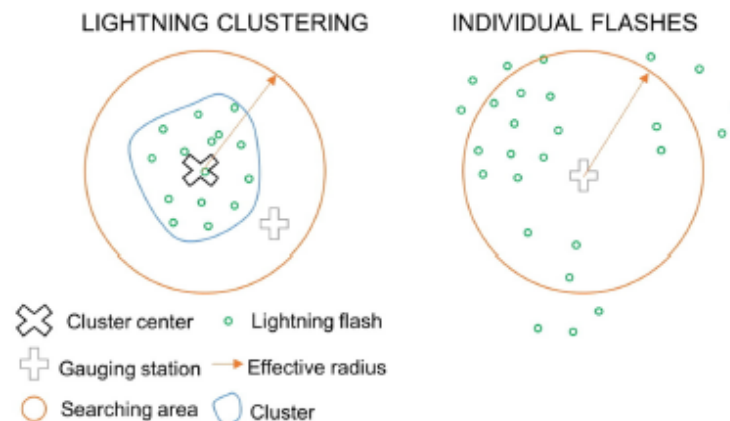


Fig. 1. Demonstration of the two different approaches of the lightning a) searching from the lightning cluster center in searching area defined by an effective radius for gauging stations or b) searching from the gauging station in searching area defined by an effective radius for individual lightning flashes.

coefficient of determination of 0.9 for a 30 km resolution grid. The resolution of 30 km is also found to give very good results in temporal correlation. Michaelides et al. (2009) employed a gridded methodology on the rain gauges on Cyprus Island splitting the area of interest in 12 areas and correlating rain with the number of flashes for different scenarios of lightning and rain. The detection of lightning activity is applied within a 10–15 km radius around the rain gauges and different time lags for rain amounts higher than 5 mm. Three flood events are analyzed in this study with rather poor performance in correlation. The extended analysis of Michaelides et al. (2010) in rainfall–lightning relationship identification for nineteen rainy events in Cyprus employing a spatio-temporal statistical methodology gives improved correlation results. With the use of TRMM data for different parts of India and for the time period of 2003–2011, Singh et al. (2014) found average positive correlation between lightning flashes and convective rainfall reaching 0.53. Also, for the time period of 1998–2010, Singh et al. (2013) found high correlation (0.68–0.81) between lightning flashes and convective rainfall over south-southeast Asia. Bamolas et al. (2008) studied a flash flood event in Catalonia and found that within a 6 km radius rain–lightning correlation increases when there are more flashes in the effective radius (more than 100 flashes in 30 min). There is significant evidence from previous studies that lightning can be established as an important tool for the evaluation of thunderstorm and even the nowcasting of potentially disastrous storms. Hence, the variation in the different studies' results infers a strong dependency of rainfall vs lightning correlation, to the methodology, the data type, the geographical location of the case study (insular, coastal or continental) and other climatological factors.

Lightning clustering has been widely used in the field of lightning analysis both for nowcasting lightning activity and associating lightning activity with precipitation. Strauss et al. (2013) performed spatio-temporal clustering based on a temporal sliding-window and then estimated the kernel density using the Atmospheric Discharge Density

Estimator tool (EDDA). Thereafter, correlation was estimated between lightning active cells and precipitation structures identified by weather radar images. Image segmentation was applied for different values of spatial and temporal shift giving results from 0.1 to 0.8 for two case studies of flash flood in the Sao Paulo State, Brazil. Kohn et al. (2011) with the aim of Warning Decision Support System-Integrated Information (WDSS-II) lightning visualization tool that provides tracking and prediction of the evolution of electrically active cells with hierarchical k-means clustering, evaluated lightning activity for the nowcasting of the storm track. Probability of detection reaches 0.52 and 0.39 for effective radius 5 km and for a lead time of 30 min and 120 min correspondingly. Pineda and Montanya (2009) used hierarchical agglomerative clustering in Catalonia in order to identify areas with similar convective triggering mechanisms.

This paper aims to investigate the relationship between precipitation amount and flash density. Coefficient of determination is used to measure correlation between lightning flashes and rain keeping only non-zero pairs of lightning–rain in the estimation. Also, a new strategy to find relationship between lightning activity and precipitation is introduced due to the use of clusters for the grouping of the lightning flashes in space and time. In Section 2, the datasets are presented along with the methodology of both correlation estimation and clustering. Section 3 concerns the study area and Section 4 presents the results of the 2 applied methodologies. The main results are summarized in Section 5.

2. Materials and methods

2.1. Datasets

Lightning data used in this work are acquired from the Global Lightning Network (GLN) and provided by Unidata (<http://www.unidata.ucar.edu/data/lightning/gln.html>) for the time period September 2012 to June 2014. The domain of study for the lightning flashes is confined from 22° to 28° E and 33.5° to 36.5° N. GLN is a cutting-edge technology system which consists of lightning stroke detection sensors strategically located at more than 150 international hosting partner sites. The efficiency of this system reaches 90–95% with corresponding location accuracies less than 1 km. The lightning data have 1-minute temporal resolution and concern cloud-to-ground lightning stroke data and some cloud flash discharges. Furthermore, the rain data recorded from 22 meteorological stations all over Crete in 10 minute high temporal resolution for the time period from September 2012 to June 2014

Table 1
The algorithmic steps of lightning cluster analysis.

Cluster analysis steps
1. Spatio-temporal clustering of lightning
2. Definition of searching area around the center of the cluster
3. Probability estimation for the clusters which contain gauges in the searching area

have been used. The rain data is provided by meteorological stations of the National Observatory of Athens (NOA).

2.2. Lightning clusters

In order to examine the correlation of rain events with lightning activity two different approaches are applied. Fig. 1 demonstrates the strategy for a) lightning clustering and b) individual lightning flashes. In the first approach, flashes are treated as group-entities according to their spatio-temporal ID (longitude, latitude, time). In order to identify the physical groups of lightning, a clustering method is applied. Clustering holds from the idea that groups of data are identified and organized in classes or clusters based on their similarities. Hence, according to the attribute space of the data, clustering algorithms find regions that can be separated from the others due to the dissimilarities and form a separate group. Here, for the lightning flashes the time of occurrence along with the x and y coordinates are used as attributes for the identification of regions with intense lightning activity.

Thereupon, an effective radius from the center of each cluster is considered, within which the area is searched for gauging stations. Different effective radii are tested for which the existence of gauging stations in the searching area is examined. Probability of coincidence is estimated according to whether at least one of the gauging stations in the searching area of the lightning cluster has rain records within the duration of the lightning cluster. The lightning cluster duration is defined from the minimum and maximum time instants of the lightning flashes which are members of this cluster, t_1 – t_2 . Other cluster characteristics included in the analyses along with the cluster duration are the number of flashes in the cluster and the coverage area of the cluster.

A lightning cluster for which there is at least one gauging station at the searching area with recorded rain of the requested rain intensity within the time period of the cluster will be hereafter referred to as effective cluster. The probability is defined as:

$$P_{lr} = \frac{NEC}{NC}$$

where i is intensity of the rain events of interest, r is the effective radius, NEC is the number of effective clusters and NC the number of all the clusters which include gauging stations in the searching area. Probability is evaluated as a correlation measure between the lightning activity and rain events. The intention in this analysis is to find out if organized structures of flashes could potentially be an indicator of a thunderstorm in the wider area. Both the probability of coincidence and the special characteristics of the clusters are evaluated. The steps of the clustering approach are synoptically presented in Table 1.

For the cluster to be related to a rain event recorded in a station, the gauging station should be 'close' to the station which means that the gauging station is within the cluster's searching area according to the effective radius applied. Also, the time the rain event is recorded should be within the time interval of the cluster which is defined by the first and last recorded lightning flashes in the lightning cluster. More than one cluster can be related with a rain event according to the distance and time criterion previously described.

Table 2
Correlation categories according to Allik et al. (2014).

Squared Pearson coefficient of determination (R^2)	Correlation characterization
1	Perfect
0.7–0.9	Strong
0.4–0.6	Moderate
0.1–0.3	Weak
0	Zero

Table 3
The algorithmic steps of lightning correlation analysis.

Correlation analysis steps
1. Definition of searching area around the center of the gauging station
2. Time series of lightning and rain accumulated for 10–60 min.
3. Time series of rain shifted 0–60 min.
4. Pairs of the time series filtered on zero values. Exclusion of pairs having zeros.
5. Estimation of correlation

2.2.1. Clustering methods

In order to group the points of flashes in space and time the clustering algorithm of k-means (MacQueen, 1967) is applied. Simple, efficient and widely used for a variety of applications of different disciplines (Jain et al., 1999; Jain, 2010; Wagstaff et al., 2001) k-means is considered as the ideal tool for the classification of lightning in space and time. The k-means starts with k random initial points as centers of the clusters and assigns the points to the closest clusters so as to reduce the squared error. The centers of the clusters are updated to be the mean of the constituent points. More specifically, let $X = \{X_i\}, i = 1, \dots, n$ be the n-dimensional set of points to be clustered and $C = \{C_j\}, j = 1, \dots, J$ be the set of J clusters. Points are arranged to the corresponding clusters so as to minimize the within-clusters sum of squares. New centers $M = \{\mu_j\}, j = 1, \dots, J$ are estimated from the constituent points of the clusters and all the points are rearranged to the closest clusters. The within-clusters sum of squares is defined as:

$$WCSS_{C_j} = \sum_{x_i \in C_j} \|x_i - \mu_j\|^2.$$

The goal of k-means is minimization of the sum of WCSS for all clusters:

$$\arg \min_c \sum_{j=1}^J WCSS_{C_j}$$

The algorithm of k-means is a greedy, NP-hard problem which can be minimized only if the number of clusters is fixed (Jain, 2010). In this study, the number of clusters is decided from another algorithm, the so-called G-means (Hammerly and Elkan, 2003). G-means algorithm

Table 4
The rain 99th percentile for each gauging station for different time windows for the period of analysis 2012–2014.

ID	Gauging station	Time window (min)					
		10	20	30	40	50	60
0	Agios Nikolaos	3.20	4.60	6.19	7.00	8.00	9.20
1	Alikianos	3.00	4.20	5.00	6.00	6.67	7.40
2	Anogeia	3.80	5.26	6.80	8.00	9.02	10.33
3	Chania	4.80	7.00	9.20	10.15	11.17	12.26
4	Chania Center	3.00	4.60	6.00	7.20	7.80	8.40
5	Falasarna	5.00	7.06	8.80	11.42	12.85	14.45
6	Fourfouras	4.81	7.11	8.59	10.60	12.20	13.03
7	Frigma Potamon	4.00	5.60	7.02	8.09	9.23	10.40
8	Heracion Port	5.99	7.16	9.50	9.99	11.56	12.49
9	Ierapetra	5.54	8.20	9.90	10.75	11.87	12.80
10	Knossos	4.62	6.82	8.68	10.40	11.35	11.80
11	Lentass	3.40	4.80	5.64	6.20	6.60	6.80
12	Metaxochori	3.40	5.24	6.64	8.39	9.19	10.00
13	Moiros	4.20	6.14	7.60	8.80	9.27	10.00
14	Paleochora	4.20	5.43	6.20	7.00	7.16	7.80
15	Plakias	3.40	4.64	5.40	6.00	7.20	7.80
16	Rethymno	3.80	5.80	7.71	9.15	9.94	10.20
17	Samarina	3.80	6.06	8.40	10.00	11.60	13.07
18	Sitia	4.80	7.60	9.00	9.88	10.80	11.78
19	Spili	3.80	5.60	7.26	8.40	9.80	10.90
20	Tzermiadi	3.37	5.19	6.60	7.95	9.00	10.00
21	Vryses	3.83	6.60	8.00	9.34	10.53	12.19
Average (mm)		4.08	5.94	7.46	8.67	9.67	10.60

Table 5

The coefficient of determination between rain and lightning flashes for the top hourly rain intensity event of each gauging station for the period of analysis 2012–2014.

Station	Event characteristics			Coefficient of determination (R^2)						
	Max rainfall intensity (mm/h)	Max flash intensity (flashes/h)	Date	Time lag (min)						
				0	10	20	30	40	50	60
Agios Nikolaos	16.2	2	27/12/2013							
Alikianos	16.2	0	3/12/2013							
Anogetia	29.2	7	16/12/2013	0.23	0.27	0.27	0.35	0.35	0.45	0.45
Chania	33.8	41	24/10/2012	0.17	0.30	0.52	0.70	0.70	0.62	0.62
Chania Center	17.2	3	9/10/2012							
Falasarna	39.2	0	28/1/2014							
Fourfouras	33.8	28	7/8/2013			0.25	0.39	0.68	0.79	0.56
Fragna Potamon	22.6	0	5/3/2014							
Heraklion Port	73	2	27/12/2013	0.31	0.31	0.30	0.33	0.35	0.33	0.31
Ierapetra	36.4	0	7/3/2014							
Knossos	27.4	81	17/11/2012					0.15	0.26	0.42
Lentas	23.8	11	20/11/2012						0.30	0.30
Metaxochori	28.6	1	21/9/2013							
Moires	18.4	2	26/1/2014							0.19
Paleochora	14.2	39	20/11/2012				0.17			
Plakias	25.8	0	14/5/2013							
Redymno	19.4	0	9/10/2012							
Samaria	21.6	72	20/11/2012	0.24	0.16	0.16				
Sitia	26.6	3	25/12/2013	0.37	0.33	0.25				
Spili	20.4	30	25/1/2014				0.14	0.14	0.16	0.16
Tzermiadio	17	161	8/11/2012				0.05	0.11	0.22	0.22
Vryses	61.6	139	16/11/2012				0.14	0.19	0.17	0.16
Average	28.29	28.27		0.26	0.27	0.27	0.29	0.33	0.36	0.34

splits the data in groups with the aid of k-means until the data currently assigned to each cluster follow a Gaussian distribution. More specifically, if the data in a cluster are Gaussian, the cluster is not further split, in a different occasion the cluster is split using k-means ($k = 2$). For this study, every time k-means is applied the random initialization of the centers is executed 10 times in order to achieve smaller squared error. Chi-square goodness of fit gaussianity test (Snedecor and Cochran, 1989) is applied on the data of every cluster. The test statistic is a chi-square random variable (χ^2) defined by the equation:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i}$$

where o_i and e_i are the observed and expected frequency for bin i respectively, if data is divided in k bins (Cruz et al., 2015). The level of significance for the test is chosen to be $\alpha = 0.0001$. The test of Gaussian fit is not applied on the raw 3-dimensional data but on the projection of the data to 1 dimension. Let $v = c_1 - c_2$ be the 3-dimensional vector, connecting the centers of two clusters. Due to the fact that v is considered to be significant in k-means, data are projected on v :

$$x_i' = \langle x_i, v \rangle / \|v\| \quad \forall x \in c_1, c_2.$$

2.3. Lightning–rain correlation

In the second approach, lightning flashes are treated as individual entities. An effective radius from the center of each gauging station is considered within which the area is searched for lightning flashes. Different effective radii are tested for which the existence of lightning flashes in the searching area is examined. A correlation criterion is used to investigate the relationship between lightning and rainfall.

The number of flashes and the rain accumulation time series in the period of analysis are used for different time lags and time windows. Time lags are defined as the time shifts of the rain time series compared to the lightning time series. This is important to investigate, as the response of a time series compared to another can be delayed. With regard to this analysis, the rain time series is shifted 10, 20, 30, 40, 50 and 60 min (time lag) posterior to the lightning time series for the period of analysis, based on the fact that lightning activity precedes the precipitation evolution (Soula et al., 1998; Strauss et al., 2013). Thereafter from the shifted and original time series are selected the non-zero pairs of rain accumulation and lightning flashes for which R^2 is estimated. The same procedure is followed for flashes and rain accumulated in different time windows, from 10 min to 60 min with a 10 minute time step. Also different scenarios for the number of flashes are tested (more than 0, 5, and 10 flashes). This is essential as a small number of flashes can lead to

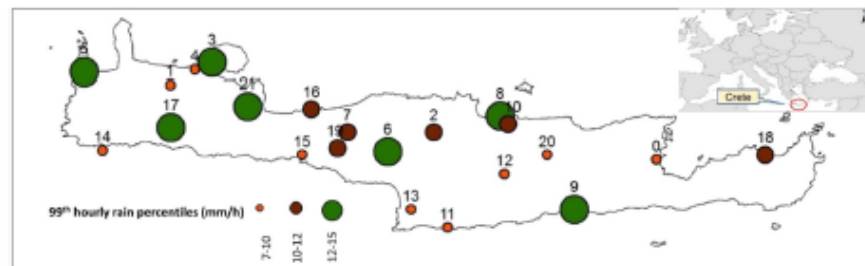


Fig. 2. The spatial distribution of the 99th percentile of hourly rainfall for the gauging stations of Crete over the period of analysis, 2012–2014.

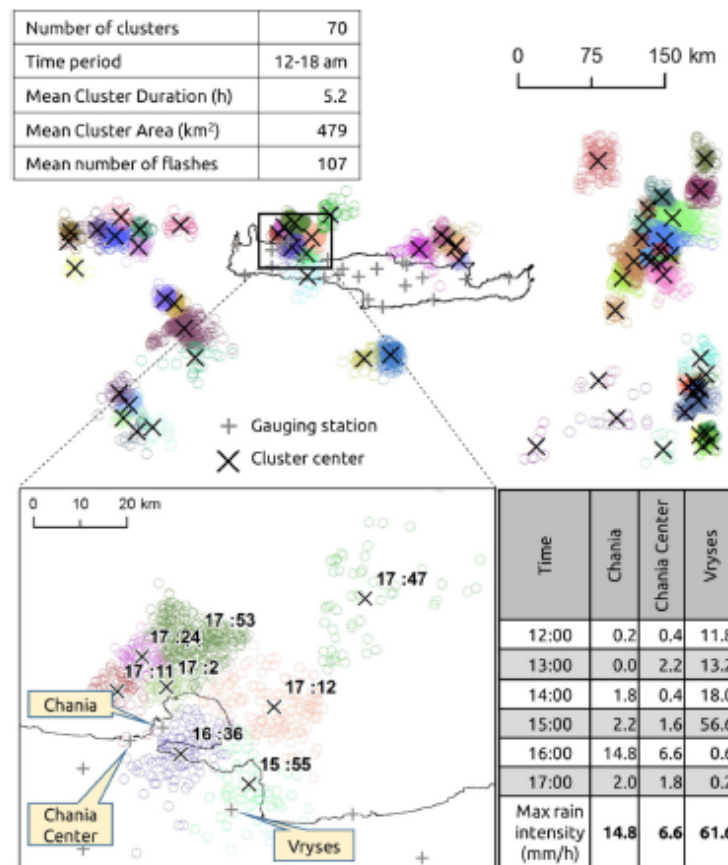


Fig. 3. Example of the lightning cluster methodology for the 16/11/2012 intense rain event. All the clusters around Crete as well as a zoom in the area of interest are presented. (For interpretation of the references to color in this figure, the reader is referred to the online version of this chapter.)

bias and misleading results (Michaelides et al., 2009). Correlation results are accepted if the 90% confidence level is satisfied. The steps of the correlation approach are synoptically presented in Table 3.

2.3.1. Correlation criterion

Correlation is estimated with the aid of squared Pearson coefficient of determination (R^2) for the non-zero pairs of lightning flashes and rain intensity. Correlation is a statistical measure to denote the relationship between variables and varies between 0 and 1. If there is no relation between the variables correlation is 0. Increased strength in the relationship of variables gives high correlation with the value of 1 implying a perfect relationship. Zero or very low values of rain and lightning flashes lead to enhanced correlation (Koutroulis et al., 2012) which is avoided here by excluding the zero values. The reason that zero values are excluded is also because the goal is to identify if the amount of rain in a thunderstorm is associated with the number of lightning flashes that occurred in the wider area. For the characterization of correlation the categories are used as presented in Table 2.

3. Case study

The methodology developed in this study is applied in the island of Crete which is located in the southern part of Greece (Fig. 2). Crete which is the largest island in Greece and the fifth largest in the Mediterranean Sea covers an area of 8265 km², has a mean elevation of 482 m and an average slope of 228 m/km. Mountains are dominant

in the landscape with Lefka Ori (2453 m) in the east of the island, Iidi (2456 m) in central Crete, and Dikti (2148 m) and Thripti Mountains (860 m) in the east. The climate of Crete is affected by both the climatic zones of the Mediterranean and North African, though it is primarily characterized as sub-humid Mediterranean with prolonged, dry and hot summer periods and humid relatively cold winter (Tsanis et al., 2011). Precipitation is not uniformly distributed in the island, with the northwest part receiving greater precipitation than the southeast part of the island (Koutroulis et al., 2010; Naoum and Tsanis, 2003). Also, the majority of rain events in Crete and especially the ones that bring high precipitation, are triggered by cyclonic systems of specific characteristics (Iordanidou et al., 2014; Koutroulis et al., 2010).

The 99th percentile of hourly rain for every gauging station in Crete for the period of analysis is presented in Fig. 2. Each station in the figure is represented with the ID that corresponds to Table 4, where the 10–60 min rain percentiles for each station are shown. For more than half of the stations, the 99th percentile of hourly rain exceeds 10 mm/h. Also, more than half of the stations with rain intensity higher than 12 mm/h are observed in the west side of the island. At this point it has to be noted that the gauging stations are not uniformly distributed over Crete with the majority located in the western part of the island (Koutroulis et al., 2011). The inland stations with high hourly rain are in the wider area of mountainous regions (Lefka Ori: stations 17 and 21 and Psiloritis: stations 19, 7, 6 and 2) and as such greatly affected by orographic rain (Koutroulis and Tsanis, 2010).

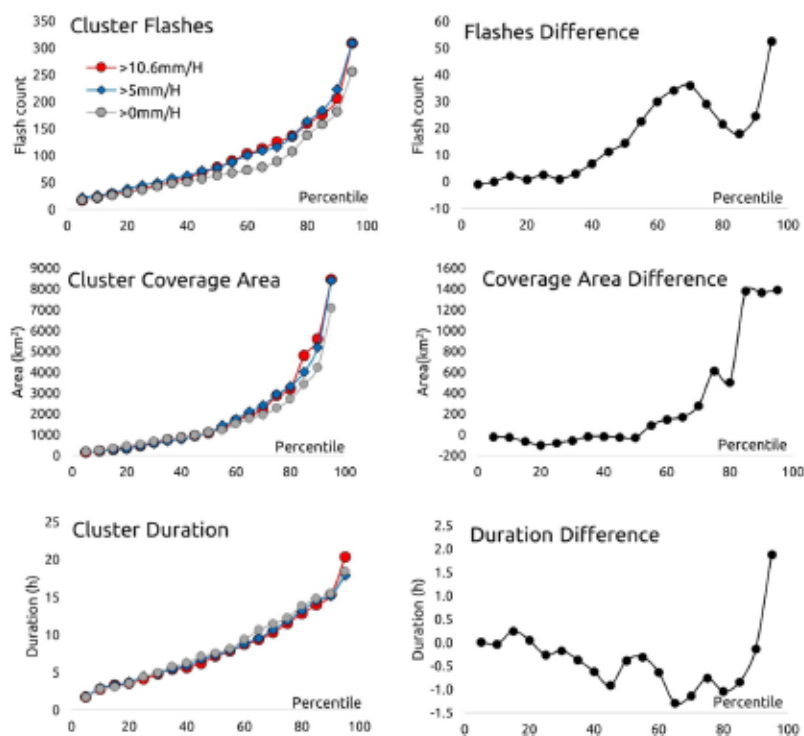


Fig. 4. On the left panel: The lightning-clusters' characteristic cumulative distribution concerning the clusters related to hourly rain events over 10.6, 5 and 0 mm/h. On the right panel: the difference between clusters giving high hourly rain and the ones giving any rain, for the total period of analysis (2012–2014).

4. Results and discussion

4.1. Lightning clusters

The spatio-temporal clusters for the time period of analysis are estimated with the aid of k-means and G-means, as described in Section 2. An example of the clusters of lightning flashes is demonstrated in Fig. 3. Clusters of lightning are noted with different bubble colors, their center is pointed out with the symbol x and the gauging stations are symbolized with a cross (+). The specific example is within a 6-hour interval (12–18 UTC) for a rain event which occurred in 16/10/2012 and mainly affected Western Crete. Seventy lightning clusters have been identified for this event with mean cluster duration of 5.2 h, mean cluster area 497 km^2 and mean number of flashes more than 100. The zoom in the affected area in Fig. 3 shows that the centers of the clusters are very close to the gauging stations affected and the mean hour of those clusters is close to the recorded time of the intense rain events that occurred at the 3 indicative gauging stations of Chania, Chania Center and Vryses.

The cumulative distribution of the general characteristics of the lightning clusters for all the period of analysis (2012–2014) is presented in Fig. 4 for an effective radius of 50 km. The horizontal axes depict the number of clusters in terms of percentile (from 5th to 95th) and the vertical axes depict the different cluster characteristics for about 4000 lightning clusters. The first column of the figure shows the cumulative distribution of the clusters' characteristics while the second column shows the differences of clusters related to non-zero rain events to those related to rain higher than the 99th percentile (rain higher than 10.6 mm/h). The number of flashes, area of coverage and duration of the clusters are examined for all the effective clusters giving non-zero rain events and for those specifically related to at least one event of

hourly rain higher than 5 mm/h or 10.6 mm/h (the mean 95th and 99th percentile of rain for all gauging stations).

According to Fig. 4, clusters related to high rain events have a greater number of flashes and cover a larger area which is most evident for the 50th percentile and above. The differences between the cluster duration for the different rain cases are not as significant. In this case, the majority of the high rain clusters last less than those concerning all rain events. Root mean square deviation (RMSD) was estimated for the three characteristics of cluster analysis giving $\text{RMSD}_f \approx 22$ flashes, $\text{RMSD}_a \approx 585 \text{ km}^2$ and $\text{RMSD}_d \approx 45 \text{ min}$ for the number of flashes, area of coverage and duration of the clusters accordingly. Generally, clusters related to intense rain event are in the majority of cases larger and with smaller duration.

The probability of coincidence of a lightning cluster with specified duration and number of flashes with an hourly rain event is presented in Fig. 5. With regard to the 3-dimensional figures of Fig. 5, the two horizontal axes concern the 10th–95th percentiles of the number of flashes and cluster duration. More specifically, the axis for the cluster duration concerns the clusters having duration less or equal to the values of the labels and the axis for the number of flashes concerns the clusters whose number of flashes exceed the corresponding values of the labels. The analysis is applied for different effective radius (10–50 km). According to the mean probability over the cluster duration and flashes presented at the top of Fig. 5, 25 and 30 km are the optimum affective radii around which most rain events over 5 mm/h (95th percentile of hourly rain) are detected. This is in agreement with Soula and Chauzy, 2001 who also find with a gridded methodology 30 km to be the optimal resolution. Also, in Fig. 5 according to the detailed diagrams for every searching radius, better probability of coincidence is observed for clusters having more lightning flashes and shorter duration. For

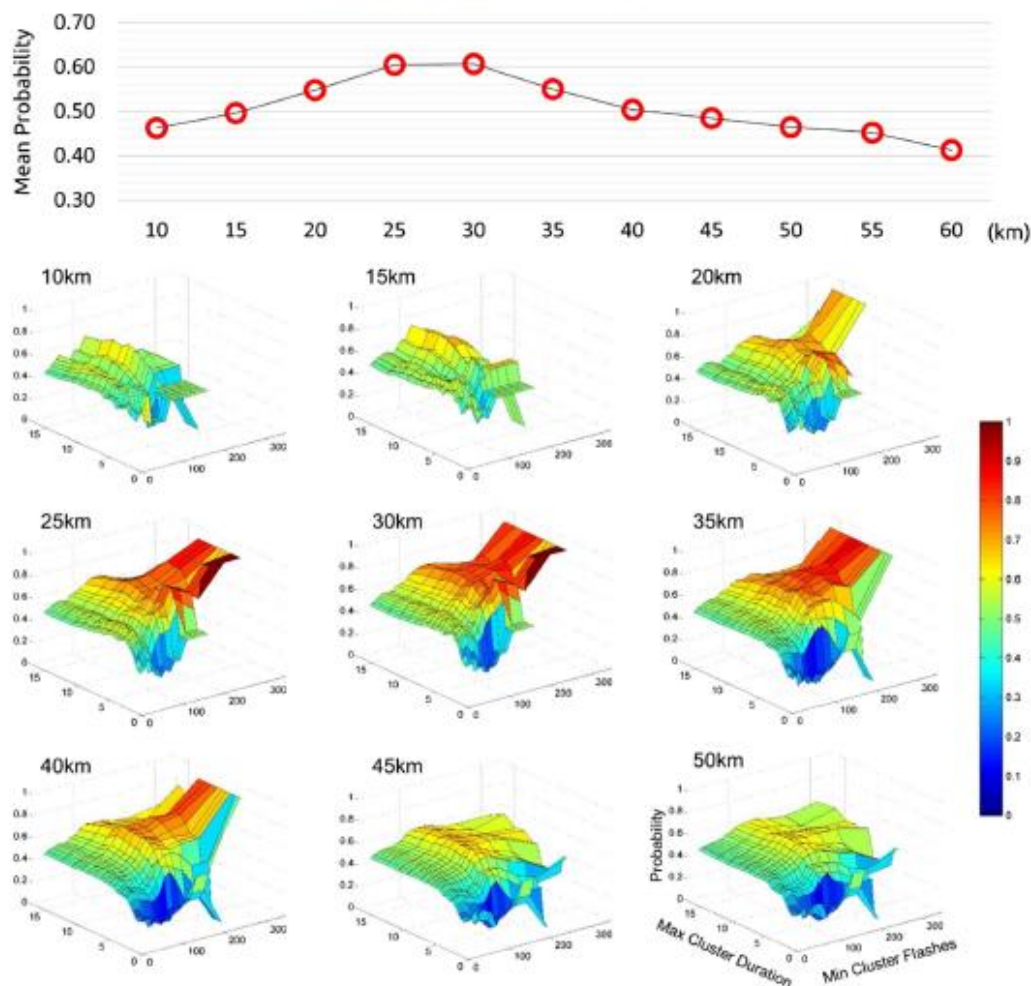


Fig. 5. The probability of a lightning-cluster according to its duration and number of flashes to coincide with an hourly rain event with rain higher than the 95th percentile (5 mm/h) for the period of analysis 2012–2014.

example, probability for 30 km searching radius is higher than 0.6 when the cluster has more than 150 lightning flashes.

4.2. Lightning–rain correlation

This section includes the results of the methodology where lightning activity is detected in a searching area around the gauging station defined by the effective radius. In Fig. 6 is demonstrated the mean probability of coincidence of hourly 99th, 95th and 90th percentile rain events with lightning activity (more than one lightning flashes in the searching area). The mean probability is estimated over all time lags (0–60 min) and windows (10–60 min) and over all the effective radius (10–100 km) for each gauging station. The colored bubbles in each graph correspond to the probabilities which are lower or equal to the noted value and higher than the value of the preceding bubble. According to the figure, it emerges that hourly rain over the 99th percentile is more probable to be related with lightning activity in the wider area compared to rain events of lower intensity. Also, stations located on the north coast are mostly related with lightning activity. In addition,

the gauges of the West Coast have higher probability to be related with lightning activity compared to the others.

The mean coefficient of determination for different time lags and windows is presented in Fig. 7. The mean coefficient of determination is estimated over all gauges and effective radius. In the left column of the figure, the average is also taken over all time windows while there is a different estimation for each time lag and in the right column the average is taken over the different time lags having a different estimation for every time window. In the first row is demonstrated the coefficient of determination for rain events higher or equal to the 99th percentile of rain and different amount of flashes in the searching area. The coefficient of determination is higher when lightning flashes in the surrounding area are more than 10 for both cases of different time windows and lags. The difference in coefficient of determination between having more than 10 or 5 flashes compared to having more than 0 flashes is significant. Also, coefficient of determination reaches 0.75 (strong correlation) for 10 min time window compared to the other time windows where it is much lower (moderate correlation between 0.4 and 0.6). This is normal because rain intensity is expected to have less variation for smaller time intervals. Additionally, in all cases of different time

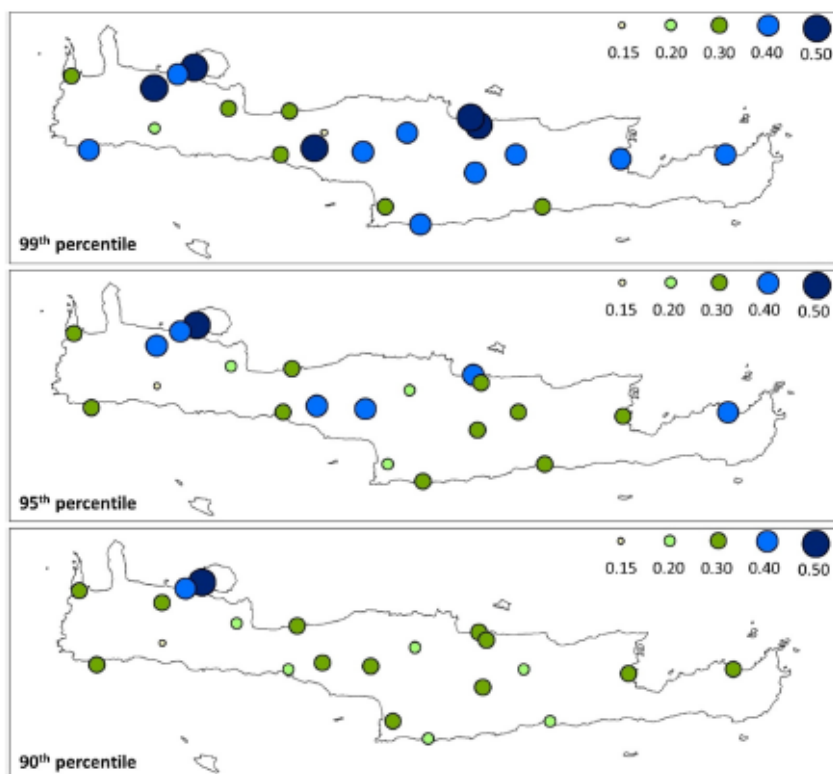


Fig. 6. The mean probability of coincidence of hourly 99th, 95th and 90th percentile precipitation events with lightning activity for the period of analysis 2012–2014. (For interpretation of the references to color in this figure, the reader is referred to the online version of this chapter.)

windows and time lags coefficient of determination achieves moderate values between 0.4 and 0.6. In the second row of Fig. 7, given more than 10 flashes, the mean coefficient of determination for different rain accumulations is estimated. The coefficient of determination is higher for greater rain accumulations. The difference between the 99th rain percentile and the other rain percentiles is significant. Less significant is the difference between the 95th and 90th rain percentiles. More specifically, for rain events of the 99th percentile coefficient of determination is moderate (0.4–0.6) while in the two other cases it is weak (0.1–0.3).

Apart from the general overview mean coefficient of determination on all stations gives, we also examined coefficient of determination on the different stations to have a spatial perspective. In Fig. 8 is estimated the mean coefficient of determination for every gauging station for the 99th, 95th and 90th percentiles of rain. The mean coefficient of determination is estimated over all time lags (0–60 min) and windows (10–60 min) and over all the searching radius (10–100 km) for each gauging station, given that more than 10 flashes exist in the surrounding area of the station. Also, only statistically significant (at 90%) coefficient of determination terms are included in the mean coefficient of determination estimation. The mean coefficient of determination is higher for rain events of greater intensity (99th percentile). More than half of the gauging stations' coefficient of determination exceeds 0.5 in this case. For the 95th percentile approximately half of the stations have coefficient of determination exceeding 0.3. On the contrary, just 7 out of 22 gauging stations have a significant coefficient of determination for the 90th rain percentile. Spatially, the 99th percentile rain for gauging stations in the west side of the island is more correlated with the number of flashes ($R^2 > 0.5$). Also, for many west gauging stations

in both 99th and 95th percentiles of rain cases the values of coefficient of determination are strong (higher than 0.75).

In Fig. 9 is estimated the mean coefficient of determination for every gauging station for more than 0, 5 and 10 flashes in the surrounding area of each station. The mean coefficient of determination is estimated over all time lags (0–60 min) and windows (10–60 min) and over all the searching radius (10–100 km) for each gauging station for the 99th percentile of rain of each station. For each of the three cases of flashes more than half of the gauging stations have coefficient of determination higher than 0.5. Coefficient of determination generally as it is demonstrated in Fig. 9 is higher when more flashes are present in the wider area (more than 10 or 5 flashes in the searching area). Here also, coefficient of determination is higher in the west side of the island. Comparing Fig. 8 and Fig. 9, while in Fig. 9 for the 99th percentile of rain for all cases of more than 0, 5, and 10 flashes the majority of gauging stations have moderate-strong correlations, in Fig. 8 lower rain percentiles have higher impact in correlation as half of the stations have moderate-strong correlations for the 95th percentile of rain and only 5 of the 22 stations have moderate-strong correlations for the 90th percentile of rain.

In Table 5 and Fig. 10 the case studies of the most intense hourly rain events for each gauging station and their correlation with the number of flashes in an area 50 km around each station are shown. The coefficient of determination is examined over a 24 h interval including 12 h before and after the intense rain event. Only the non-zero pairs of rain-flashes are considered for the coefficient of determination estimation. The rain accumulation and the flash count are hourly and the time lag between the time series of the rain and the flashes concerns time lags from

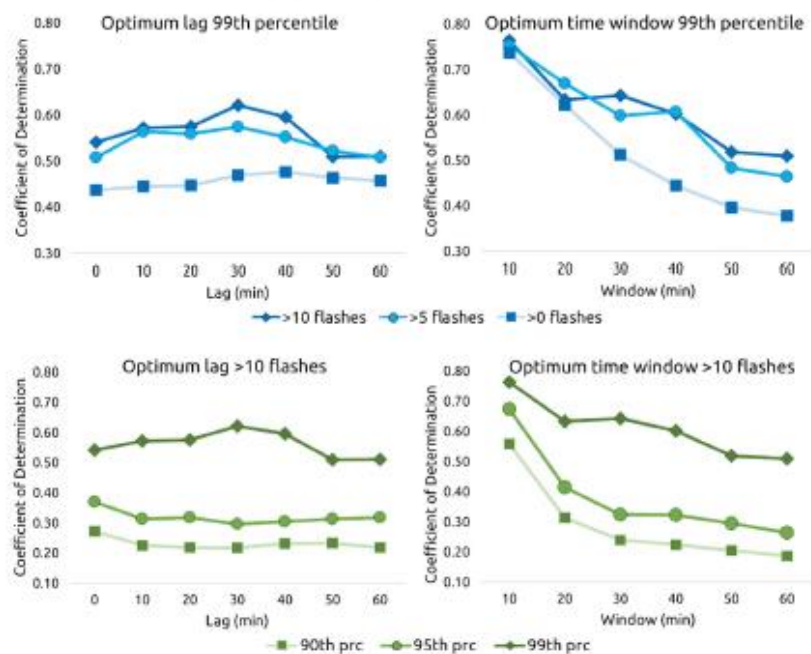


Fig. 7. The mean coefficient of determination for different time lags and windows for the period of analysis 2012–2014 for variable flashes and 99th percentile of rain (top) and variable rain percentiles and more than 10 flashes.

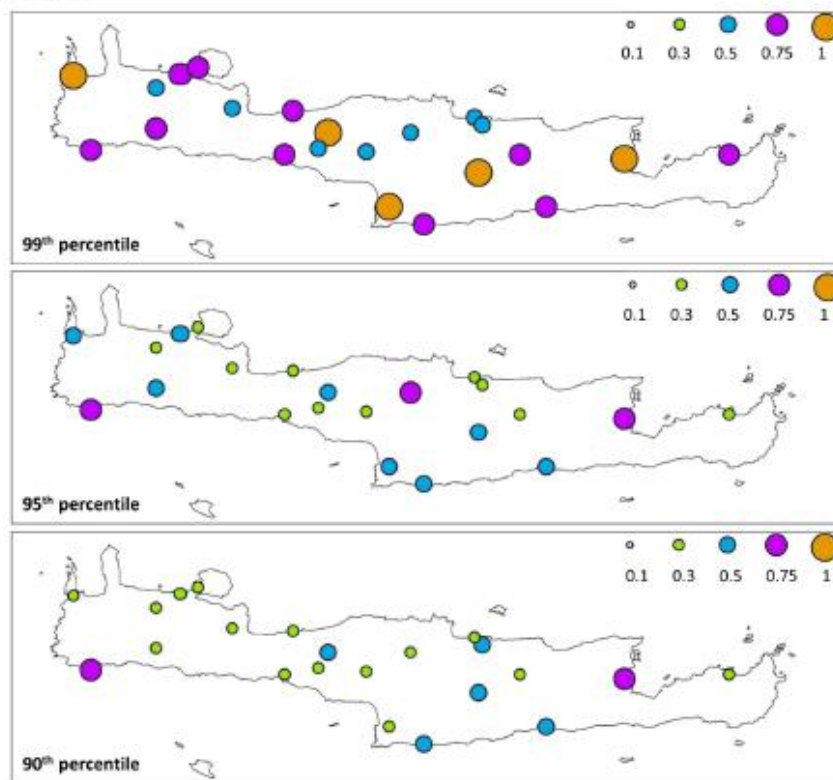


Fig. 8. Mean coefficient of determination for the 90th, 95th and 99th precipitation percentiles given more than ten flashes for the period of analysis 2012–2014.

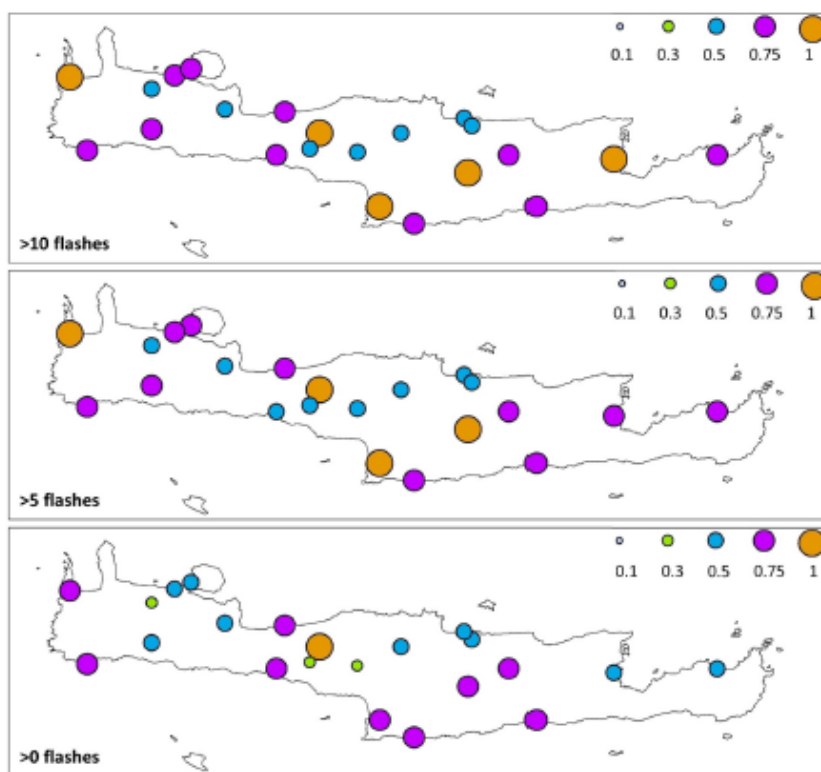


Fig. 9. Mean coefficient of determination for more than 10, 5 and 0 flashes for the 99th precipitation percentile for the period of analysis (2012–2014).

zero to 60 min with a ten minute time step. The average hourly rain for the most intense hourly rain events of the gauging stations is 28.29 mm/h and the corresponding mean number of flashes is approximately 28 flashes/h. In 10 out of 22 gauging stations, the intense rain event is also a thunderstorm event (>5 flashes/h). Only for a minority of the gauging stations (6 out of 22) no lightning is recorded in the wider area. With regard to the coefficient of determination, 50 minute lag has the highest score, as the mean coefficient of determination for all the stations in this case reaches 0.36. According to Table 5, the 5 of 10 gauging stations (50% of the stations) with intense thunderstorm events, have moderate-strong correlation between rain intensity and the number of lightning flashes. The graphical representation of the 5 top-correlated events is presented in Fig. 10 for the optimal time lag as it is given in Table 5. According to the graphs of Fig. 10, the more intense the rain, the more flashes are recorded in the wider area of the thunderstorm event.

5. Conclusions

Spatial and temporal information from a raingauge network in Crete and lightning data from the GLN are used to investigate the relationship between lightning activity and precipitation. Two different methodologies are applied for the coupling of the lightning with the rain activity. In the first approach, lightning flashes are identified within an effective radius around each gauging station. In the second approach, rain events are identified within the effective radius of each lightning cluster.

Environmental and cloud microphysical factors have not been incorporated. Nevertheless, different factors can affect lightning activity such as thermodynamic and orographic ones, the presence of cold frontal

systems and the origin of the air mass (Altaratz et al., 2003). However, the use of lightning is beneficial considering that it can be detected thousand kilometers away from its source, with great accuracy. This is very important especially for regions that are not covered by radar or do not have local meteorological systems (Kohn et al., 2011). The low spatial resolution of the gauging stations' network as well as the detection efficiency of the lightning detection system also constitute physical limitations of this study (Koutroulis et al., 2012). Also, the existence of a remote sensing tool with very high resolution covering the study site scale (gauging stations) would probably improve correlation as then it would be possible to distinguish convective precipitation from other types of precipitation (Petrova et al., 2014).

Both temporal and spatial relationships are distinguished between lightning and precipitation data in the context of this work. For the majority of the lightning clusters there exists at least one station with recorded hourly rain over 5 mm/h. The optimal effective radius within which rain-lightning mean coincidence reaches 0.6 is 25–30 km that is in agreement with Soula and Chauzy (2001). For the specific radius of 30 km, coincidence between lightning and precipitation exceeds 80% when more than 150 flashes exist in the cluster. Generally clusters related to more intense rain events, cover larger area, are smaller in duration and have more flashes than those of lower rain accumulation.

The correlation measure of the coefficient of determination is also applied on the time series of the lightning flash number and rain accumulation for various time windows, time lags and effective radius around the gauging stations. The application of this measure takes into consideration only 'active' pairs of lightning–rain excluding the pairs having zero values. The most intense hourly precipitation event of each gauging station is examined along with the whole time series

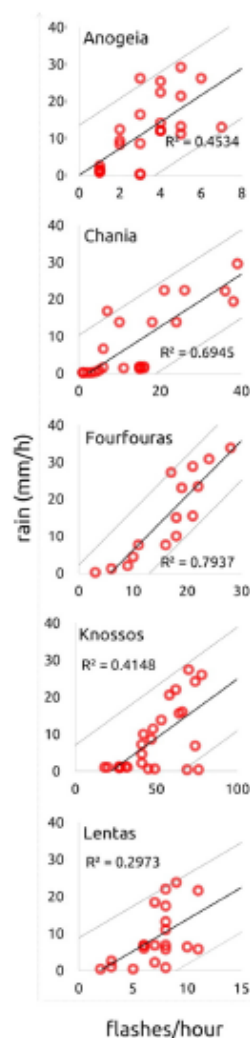


Fig. 10. Graphical presentation of the coefficient of determination between observed precipitation and lightning flashes for the 5 most correlated events of Table 5. The area between the grey lines represents the 95% confidence intervals.

of the stations for selected precipitation thresholds. Ten of the 22 stations' most intense hourly event happens to be a thunderstorm and 50% of the thunderstorm events have moderate–strong correlations. Mean correlation on the time series of rain events of specified intensity shows that more intense rain events are more correlated with the number of flashes in the searching area. Also, correlation is higher when flashes exceed the 10 flash threshold. Furthermore, smaller time windows (10 min) and 30 min time lag give the optimal values in mean correlation estimation.

According to the analysis, it occurs that lightning and rainfall are closely related. The association of these two physical phenomena is not random and it depends on the distance and the number of flashes of the storm from the region of interest. More specifically the area mostly influenced with rain due to the appearance of a group of lightning activity is within a 30 km radius from the center of the group. On the contrary, correlation between the rain and the number of flashes is

not a trivial matter. Different gauging stations might have significant differences in correlation depending on their position and the difference of the landscape (mountainous, coastal, urban) but also to the rain itself (storm direction and origin). Comparing the different time lags and windows, time lags smaller than 40 min gave the best results in correlation and 10 min time windows. Correlation in smaller time windows is expected to be higher than in bigger windows, because rain has higher uniformity in smaller time windows. According to the 22 cases of the most intense hourly rain in the gauging stations, in half of them rain was not accompanied by lightning activity. The storm direction, orographic rain, non-convective rain or even loss of sensor data could explain the absence of lightning flashes in these cases. For the other half cases where lightning activity was present 50% had correlation higher than 0.3. Again here, the storm direction but also the hourly time window where rain attitude can vary are important factors for half of the stations' rain to be weakly correlated with lightning flashes.

To the best of the authors' knowledge, the spatio-temporal clustering technique described here has not been presented elsewhere. Other work where lightning clustering is employed in time and space first use spatial clustering and then split or merge clusters of different time steps (Strauss et al., 2013). Also, software algorithms such as WDSS-II need to take as input the number of clusters k in order to do the k -means clustering procedure (Kohn et al., 2011). On the contrary, in this study k -means clustering is applied from the beginning on the spatio-temporal attributes of the lightning data and the number of the clusters is decided also automatically by an optimization algorithm so-called G-means.

The 'decoding' of the relationship between lightning activity and precipitation can provide important information for the nowcasting of thunderstorms. The combination of lightning activity of longer time period with other meteorological parameters could provide a useful tool for the construction of a warning system of extreme precipitation events.

Acknowledgments

The research reported in this paper was partly supported by the "ARISTEIA II" Action ("REINFORCE"/General Secretariat for Research and Technology) of the "Operational Education and Life Long Learning programme" and is co-funded by the European Social Fund (ESF) and Hellenic National Resources (4214). The lightning data used is supplied by Global Lightning Network (GLN) from WSI Corporation. The National Observatory of Athens is also acknowledged for providing precipitation data.

References

- Allik, A., Uiga, J., Annuk, A., 2014. Deviations between wind speed data measured with nacelle-mounted anemometers on small wind turbines and anemometers mounted on measuring masts. *Agron. Res.* 12, 433–444.
- Alaratz, O., Levin, Z., Yair, Y., Ziv, B., 2003. Lightning activity over land and sea on the eastern coast of the Mediterranean. *Mon. Weather Rev.* 131, 2060–2070. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<2060:LAOLAS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<2060:LAOLAS>2.0.CO;2).
- Barnolas, M., Atencia, A., Ibasat, M.C., Rigo, T., 2008. Characterization of a Mediterranean flash flood event using rain gauges, radar, GIS and lightning data. *Adv. Geosci.* 35–41.
- Cruz, M.G., Peters, G.W., Shevchenko, P.V., 2015. *Fundamental Aspects of Operational Risk and Insurance Analytics: A Handbook of Operational Risk*.
- Hamerly, G., Elkan, C., 2003. Learning the k in k -means. *Proc. 17th NIPS*.
- Iordanidou, V., Koutoulis, A.G., Tsanis, I.K., 2014. Mediterranean depression characteristics related to precipitation occurrence in Crete, Greece. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* 2, 6107–6139. <http://dx.doi.org/10.5194/nhessd-2-6107-2014>.
- Jain, A.K., Murty, M.N., Flynn, P.J., 1999. Data clustering: a review. *ACM Comput. Surv.* 31, 264–323. <http://dx.doi.org/10.1145/331499.331504>.
- Jain, A.K., 2010. Data clustering: 50 years beyond k -means. *Pattern Recogn. Lett.* 31, 651–666. <http://dx.doi.org/10.1016/j.patrec.2009.09.011>.
- Katsanos, D., Lagouvardos, K., Kotroni, V., Argiriou, A., 2007. Combined analysis of rainfall and lightning data produced by mesoscale systems in the central and eastern Mediterranean. *Atmos. Res.* 83, 55–63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2006.01.012>.
- Kohn, M., Galanti, E., Price, C., Lagouvardos, K., Kotroni, V., 2011. Nowcasting thunderstorms in the Mediterranean region using lightning data. *Atmos. Res.* 100, 489–502. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.08.010>.

- Koutroulis, A.G., Tzanis, I.K., 2010. A method for estimating flash flood peak discharge in a poorly gauged basin: case study for the 13–14 January 1994 flood, Giofros basin, Crete, Greece. *J. Hydrol.* 385, 150–164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.02.012>.
- Koutroulis, A.G., Grillakis, M.G., Tzanis, I.K., Kotroni, V., Lagouvardos, K., 2012. Lightning activity, rainfall and flash flooding – occasional or interrelated events? A case study in the island of Crete. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12, 881–891. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-12-881-2012>.
- Koutroulis, A.G., Tzanis, I.K., Daliakopoulos, I.N., 2010. Seasonality of floods and their hydrometeorologic characteristics in the island of Crete. *J. Hydrol.* 394, 90–100. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.04.025>.
- Koutroulis, A.G., Vrohidou, A.-E.K., Tzanis, I.K., 2011. Spatiotemporal characteristics of meteorological drought for the island of Crete. *J. Hydrometeorol.* 12, 206–226. <http://dx.doi.org/10.1175/2010JHM1252.1>.
- MacQueen, J.B., 1967. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Proceedings of the Fifth Symposium on Math, Statistics, and Probability*, pp. 281–297.
- Mazarakis, N., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Argiriou, A.A., 2008. Storms and lightning activity in Greece during the warm periods of 2003–06. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 47, 3089–3098. <http://dx.doi.org/10.1175/2008JAMC1798.1>.
- Michaelides, S., Savvidou, K., Nicolaides, K., 2010. Relationships between lightning and rainfall intensities during rainy events in Cyprus. *Adv. Geosci.* 23, 87–92. <http://dx.doi.org/10.5194/adgeo-23-87-2010>.
- Michaelides, S.C., Savvidou, K., Nicolaides, K.A., Charalambous, M., 2009. In search for relationships between lightning and rainfall with a rectangular grid-box methodology. *Adv. Geosci.* 20, 51–56.
- Nasom, S., Tzanis, I.K., 2003. Temporal and spatial variation of annual rainfall on the island of Crete, Greece. *Hydrol. Process.* 17, 1899–1922. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.1217>.
- Petrova, S., Mitzeva, R., Kotroni, V., 2014. Summer-time lightning activity and its relation with precipitation: diurnal variation over maritime, coastal and continental areas. *Atmos. Res.* 135–136, 388–396. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.10.015>.
- Pineda, N., Montanya, J., 2009. Lightning detection in Spain: the particular case of Catalonia. *Lightning: Principles, Instruments and Applications*, pp. 161–185. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-9079-0>.
- Pineda, N., Rigo, T., Bech, J., Soler, X., 2007. Lightning and precipitation relationship in summer thunderstorms: case studies in the North Western Mediterranean region. *Atmos. Res.* 85, 159–170. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2006.12.004>.
- Reale, M., Lionello, P., 2013. Synoptic climatology of winter intense precipitation events along the Mediterranean coasts. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13, 1707–1722. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-13-1707-2013>.
- Singh, D., Bachande, P.S., Singh, R.P., Nath, A., Kumar, S., Ghodpage, R.N., 2014. Lightning and convective rain study in different parts of India. *Atmos. Res.* 137, 35–48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.09.018>.
- Singh, D., Kumar, P.R., Kulkarni, M.N., Singh, R.P., Singh, A.K., 2013. Lightning, convective rain and solar activity – over the South/Southeast Asia. *Atmos. Res.* 120–121, 99–111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.07.026>.
- Snedecor, G.W., Cochran, W.G., 1989. *Statistical Methods*. Iowa State Univ. Press.
- Soula, S., Chauzy, S., 2001. Some aspects of the correlation between lightning and rain activities in thunderstorms. *Atmos. Res.* 56, 355–373. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-8095\(00\)00086-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-8095(00)00086-7).
- Soula, S., Sauvageot, H., Molinie, G., Mesnard, F., Chauzy, S., 1998. The CG lightning activity of storm causing a flashflood. *Geophys. Res. Lett.* 25, 1181–1184.
- Strauss, C., Rosa, M.J., Stephany, S., 2013. Spatio-temporal clustering and density estimation of lightning data for the tracking of convective events. *Atmos. Res.* 134, 87–99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.07.008>.
- Tzanis, I.K., Koutroulis, A.G., Daliakopoulos, I.N., Jacob, D., 2011. Severe climate-induced water shortage and extremes in Crete. *Clim. Chang.* 106, 667–677. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-011-0048-2>.
- Wagstaff, K., Cardie, C., Rogers, S., Schroedl, S., 2001. Constrained K-means clustering with background knowledge. *Int. Conf. Mach. Learn.* 577–584. <http://dx.doi.org/10.1109/TPAMI.2002.1017616>.
- Yair, Y., Shalev, S., Erlich, Z., Agrachov, A., Katz, E., Saaroni, H., Price, C., Ziv, B., 2014. Lightning flash multiplicity in eastern Mediterranean thunderstorms. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 14, 165–173. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-14-165-2014>.

8 Βιβλιογραφία

- Barnolas M, Atencia A, Llasat MC, Rigo T (2008) Characterization of a Mediterranean flash flood event using rain gauges , radar , GIS and lightning data. *Adv Geosci* 35–41.
- Bartholy J, Pongrácz R, Pattantyús-Ábrahám M (2008) Analyzing the genesis, intensity, and tracks of western Mediterranean cyclones. *Theor Appl Climatol* 96:133–144. doi: 10.1007/s00704-008-0082-9
- Bartzokas A, Lolis CJ, Metaxas DA (2003) The 850 hPa relative vorticity centres of action for winter precipitation in the Greek area. *Int J Climatol* 23:813–828. doi: 10.1002/joc.909
- Bjerknes J, Solberg H (1922) Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. *Geofys Publ* 3:3–18.
- Borovicka T, Jr MJ, Kordik P, Jirina M (2012) Selecting Representative Data Sets. In: *Advances in Data Mining Knowledge Discovery and Applications*. pp 43–70
- Campins J, Genovés A, Picornell M a., Jansà A (2011) Climatology of Mediterranean cyclones using the ERA-40 dataset. *Int J Climatol* 1614:1596–1614. doi: 10.1002/joc.2183
- Catto JL, Jakob C, Berry G, Nicholls N (2012) Relating global precipitation to atmospheric fronts. *Geophys Res Lett*. doi: 10.1029/2012GL051736
- Catto JL, Shaffrey LC, Hodges KI (2011) Northern hemisphere extratropical cyclones in a warming climate in the higem high-resolution climate model. *J Clim* 24:5336–5352. doi: 10.1175/2011JCLI4181.1
- Chatzialekou R (2016) Related Issue17: Climate in Europe. <http://www.aviamet.gr/cms.jsp?moduleId=018&extLang=LG>. Accessed 25 Jan 2016
- Courtier P, Andersson E, Heckley W, et al (1998) The ECMWF implementation of three dimensional variational assimilation (3D-Var). Part I: Formulation. *Quart J R Meteorol Soc* 124:1783 – 1807.
- Dancey CP, Reidy J (2004) *Statistics without maths for psychology*, 3rd Editio. Harlow: Pearson Prentice Hall
- Flaounas E, Raveh-Rubin S, Wernli H, et al (2014) The dynamical structure of intense Mediterranean cyclones. *Clim Dyn* 44:2411–2427. doi: 10.1007/s00382-014-2330-2
- Flocas H a., Simmonds I, Kouroutzoglou J, et al (2010) On Cyclonic Tracks over the Eastern Mediterranean. *J Clim* 23:5243–5257. doi: 10.1175/2010JCLI3426.1

Govorushko SM (2012) Natural Processes and Human Impacts.

Hamerly G, Elkan C (2003) Learning the k in k -means.

Hawcroft MK, Shaffrey LC, Hodges KI, Dacre HF (2012) How much Northern Hemisphere precipitation is associated with extratropical cyclones? *Geophys Res Lett*. doi: 10.1029/2012GL053866

Iordanidou V, Koutroulis a. G, Tsanis IK (2015) Mediterranean cyclone characteristics related to precipitation occurrence in Crete, Greece. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 15:1807–1819. doi: 10.5194/nhess-15-1807-2015

Jain a. K, Murty MN, Flynn PJ (1999) Data clustering: a review. *ACM Comput Surv* 31:264–323. doi: 10.1145/331499.331504

Jain AK (2010) Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern Recognit Lett* 31:651–666. doi: 10.1016/j.patrec.2009.09.011

Jansa A, Buzzi, A. P, Arbogast P (2001a) MEDEX, cyclones that produce high impact weather in the Mediterranean. <http://medex.inm.uib.es>.

Jansa A, Genoves A, Garcia-moya JA (2000) Western Mediterranean cyclones and heavy rain. Part 1 : Numerical experiment concerning the Piedmont flood case. *Meteorol Appl* 333:323–333.

Jansa A, Genoves A, Picornell MA, et al (2001b) Western Mediterranean cyclones and heavy rain. Part 2: Statistical approach. *Meteorol Appl* 8:43–56. doi: 10.1017/S1350482701001049

Katsanos D, Lagouvardos K, Kotroni V, Argiriou a. (2007) Combined analysis of rainfall and lightning data produced by mesoscale systems in the central and eastern Mediterranean. *Atmos Res* 83:55–63. doi: 10.1016/j.atmosres.2006.01.012

Kohn M, Galanti E, Price C, et al (2011) Nowcasting thunderstorms in the Mediterranean region using lightning data. *Atmos Res* 100:489–502. doi: 10.1016/j.atmosres.2010.08.010

Koutroulis AG, Grillakis MG, Tsanis IK, et al (2012) Lightning activity , rainfall and flash flooding – occasional or interrelated events ? A case study in the island of Crete. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 12:881–891. doi: 10.5194/nhess-12-881-2012

Koutroulis AG, Tsanis IK, Daliakopoulos IN (2010) Seasonality of floods and their hydrometeorologic characteristics in the island of Crete. *J Hydrol* 394:90–100. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.04.025

Leonard SR, Turner J, Wal A Van Der (1999) An assessment of three automatic depression

- tracking schemes. *Meteorol Appl* 6:173–183.
- Lim E, Simmonds I (2007) Southern Hemisphere winter extratropical cyclone characteristics and vertical organization observed with the ERA-40 data in 1979-2001. *J Clim* 20:2675–2690. doi: 10.1175/JCLI4135.1
- Lionello P, Bhend J, Buzzi A, et al (2006) Cyclones in the Mediterranean Region: Climatology and Effects on the Environment. In: *Mediterranean Climate Variability*, Elsevier. Amsterdam, pp 325–372
- Lolis CJ, Bartzokas A, Katsoulis BD (2004) Relation between sensible and latent heat fluxes in the Mediterranean and precipitation in the Greek area during winter. *Int J Climatol* 24:1803–1816. doi: 10.1002/joc.1112
- Lutgens F, Tarbuck E (2013) *The atmosphere, an introduction to meteorology*, 12th edn.
- MacQueen JB (1967) Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: *Proceedings of the Fifth Symposium on Math, Statistics, and Probability*. pp 281–297
- Maheras P, Flocas H a., Patrikas I, Anagnostopoulou C (2001) A 40 year objective climatology of surface cyclones in the Mediterranean region: spatial and temporal distribution. *Int J Climatol* 21:109–130. doi: 10.1002/joc.599
- Mazarakis N, Kotroni V, Lagouvardos K, Argiriou a. a. (2008) Storms and Lightning Activity in Greece during the Warm Periods of 2003–06. *J Appl Meteorol Climatol* 47:3089–3098. doi: 10.1175/2008JAMC1798.1
- Mcbride JL, Ebert EE (2000) Verification of Quantitative Precipitation Forecasts from Operational Numerical Weather Prediction Models over Australia. *Aust Weather Forecast* 15:103–121.
- Met Office (2011) *National Meteorological Library and Archive Fact sheet 2 — Thunderstorms*.
- Michaelides S, Savvidou K, Nicolaides K (2010) Relationships between lightning and rainfall intensities during rainy events in Cyprus. *Adv Geosci* 23:87–92. doi: 10.5194/adgeo-23-87-2010
- Michaelides SC, Savvidou K, Nicolaides KA, Charalambous M (2009) In search for relationships between lightning and rainfall with a rectangular grid-box methodology. *Adv Geosci* 20:51–56.
- Miglietta MM, Laviola S, Malvaldi a., et al (2013) Analysis of tropical-like cyclones over the Mediterranean Sea through a combined modeling and satellite approach. *Geophys Res Lett* 40:2400–2405. doi: 10.1002/grl.50432

- Murray R, Simmonds I (1991) A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part I: Development and operation of the scheme. *Aust Meteorol Mag* 39:155–166.
- Naoum S, Tsanis IK (2003) Temporal and spatial variation of annual rainfall on the island of Crete, Greece. *Hydrol Process* 17:1899–1922. doi: 10.1002/hyp.1217
- Neu U, Akperov MG, Bellenbaum N, et al (2013) IMILAST: A Community Effort to Intercompare Extratropical Cyclone Detection and Tracking Algorithms. *Bull Am Meteorol Soc* 94:529–547. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00154.1
- Nixon S, Trent Z, Marcuello C, Lallana C (2003) Europe’s water: An indicator-based assessment.
- Petrova S, Mitzeva R, Kotroni V (2014) Summer-time lightning activity and its relation with precipitation: Diurnal variation over maritime, coastal and continental areas. *Atmos Res* 135-136:388–396. doi: 10.1016/j.atmosres.2012.10.015
- Pineda N, Montanya J (2009) Lightning Detection in Spain: The Particular Case of Catalonia. In: *Lightning: Principles, Instruments and Applications*. pp 161–185
- Pineda N, Rigo T, Bech J, Soler X (2007) Lightning and precipitation relationship in summer thunderstorms: Case studies in the North Western Mediterranean region. *Atmos Res* 85:159–170. doi: 10.1016/j.atmosres.2006.12.004
- Reale M, Lionello P (2013) Synoptic climatology of winter intense precipitation events along the Mediterranean coasts. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 13:1707–1722. doi: 10.5194/nhess-13-1707-2013
- Rudeva I, Gulev SK (2007) Climatology of Cyclone Size Characteristics and Their Changes during the Cyclone Life Cycle. *Mon Weather Rev* 135:2568–2587. doi: 10.1175/MWR3420.1
- Sanna A, Lionello P, Gualdi S (2013) Coupled atmosphere ocean climate model simulations in the Mediterranean region: effect of a high-resolution marine model on cyclones and precipitation. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 13:1567–1577. doi: 10.5194/nhess-13-1567-2013
- Siingh D, Buchunde PS, Singh RP, et al (2014) Lightning and convective rain study in different parts of India. *Atmos Res* 137:35–48. doi: 10.1016/j.atmosres.2013.09.018
- Siingh D, Kumar PR, Kulkarni MN, et al (2013) Lightning, convective rain and solar activity — Over the South/Southeast Asia. *Atmos Res* 120-121:99–111. doi: 10.1016/j.atmosres.2012.07.026
- Simmonds I, Keay K (2000) Mean Southern Hemisphere Extratropical Cyclone Behavior in the 40-Year NCEP – NCAR Reanalysis. *J Clim* 13:873–885.

- Simmonds I, Murray RJ (1999) Southern Extratropical Cyclone Behavior in ECMWF Analyses during the FROST Special Observing Periods. *Weather Forecast* 14:878–891.
- Snedecor, George W., Cochran WG (1989) *Statistical Methods*.
- Soula S, Chauzy S (2001) Some aspects of the correlation between lightning and rain activities in thunderstorms. *Atmos Res* 56:355–373. doi: 10.1016/S0169-8095(00)00086-7
- Soula S, Sauvageot H, Molinie G, et al (1998) The CG lightning activity of storm causing a flashflood. *Geophys Res Lett* 25:1181–1184.
- Strauss C, Rosa MB, Stephany S (2013) Spatio-temporal clustering and density estimation of lightning data for the tracking of convective events. *Atmos Res* 134:87–99. doi: 10.1016/j.atmosres.2013.07.008
- Trigo IF, Davies TD, Bigg GR (1999) Objective Climatology of Cyclones in the Mediterranean Region. *J Clim* 12:1685–1696.
- Ulbrich U, Brucher T, Fink A, et al (2003) The central European floods of August 2002 : Part 1 – Rainfall periods and flood development. *Weather* 58:371–377.
- Ulbrich U, Leckebusch GC, Pinto JG (2009) Extra-tropical cyclones in the present and future climate: a review. *Theor Appl Climatol* 96:117–131. doi: 10.1007/s00704-008-0083-8
- Vich M, Romero R, Homar V (2011) Ensemble prediction of Mediterranean high-impact events using potential vorticity perturbations. Part II: Adjoint-derived sensitivity zones. *Atmos Res* 102:311–319. doi: 10.1016/j.atmosres.2011.07.016
- Wagstaff K, Cardie C, Rogers S, Schroedl S (2001) Constrained K-means Clustering with Background Knowledge. *Int Conf Mach Learn* 577–584. doi: 10.1109/TPAMI.2002.1017616
- Μαχαίρας Π, Μπαλαφούτης Χ (1984) Γενική Κλιματολογία με στοιχεία Μετεωρολογίας.
- Στάθης Δ (2016) Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. In: Μαθήματα δασικής μετεωρολογίας και κλιματολογίας, Σύνδεσμος . pp 105–132