

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ, ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



**ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΣΥΝΟΠΤΙΚΩΝ, ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΧΑΛΑΖΟΚΑΤΑΙΓΙΔΩΝ
ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ,
ΜΕ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΟ ΣΚΟΠΟ ΤΗ ΔΥΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΑΥΤΩΝ**

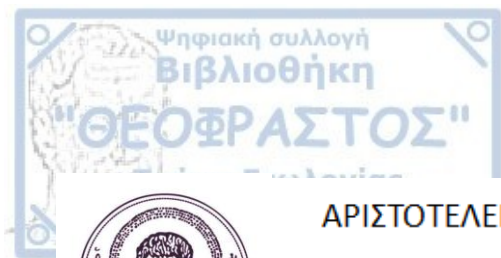
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Μεταπτυχιακής φοιτήτριας:

ΤΖΕΝΗ ΑΝΤΩΝΙΟΥ

Πτυχιούχος Μαθηματικός

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 2017



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ, ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



**ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΣΥΝΟΠΤΙΚΩΝ, ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΧΑΛΑΖΟΚΑΤΑΙΓΙΔΩΝ
ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ,
ΜΕ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΟ ΣΚΟΠΟ ΤΗ ΔΥΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΑΥΤΩΝ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: **ΘΕΟΔΩΡΟΣ ΚΑΡΑΚΩΣΤΑΣ**

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ: **ΘΕΟΔΩΡΟΣ ΚΑΡΑΚΩΣΤΑΣ, Καθηγητής Α.Π.Θ.,
ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ ΖΑΝΗΣ, Αναπληρωτής καθηγητής Α.Π.Θ.,
ΙΩΑΝΝΗΣ ΠΥΘΑΡΟΥΛΗΣ, Επίκουρος καθηγητής Α.Π.Θ.**

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 2017



Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΣΥΝΟΠΤΙΚΩΝ, ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΧΑΛΑΖΟΚΑΤΑΙΓΙΔΩΝ ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ ΜΕ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΟ ΣΚΟΠΟ ΤΗ ΔΥΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΑΥΤΩΝ

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

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



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Για την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής ειδίκευσης συνεισέφερε η στήριξη, η βοήθεια, ακόμα και η παρουσία ορισμένων ανθρώπων, τους οποίους και θα ήθελα να ευχαριστήσω.

Καταρχήν, θέλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Καθηγητή κ. Θεόδωρο Καρακώστα, ο οποίος υπήρξε ο επιβλέπων Καθηγητής της διατριβής ειδίκευσης. Η καθοδήγηση, οι συμβουλές και η στήριξη που μου παρείχε, για την εκπόνηση της διατριβής, αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, υπήρξε ανεκτίμητη. Το ενδιαφέρον και η υπομονή του ενίσχυσε την αγάπη μου για τη Μετεωρολογία και αποτέλεσε κίνητρο και έναυσμα για την περαιτέρω ενασχόλησή μου με το αντικείμενο αυτό.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τους Καθηγητές κ.κ. Πρόδρομο Ζάνη και Ιωάννη Πυθαρούλη, μέλη της τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, οι οποίοι με μεγάλη προθυμία με συμβούλευσαν και βελτίωσαν το επίπεδό μου με τις γνώσεις και με τις υποδείξεις τους.

Καθοριστικό ρόλο στις μεταπτυχιακές σπουδές μου αποτέλεσε η ευγενική αντιμετώπιση που είχα από όλους τους Καθηγητές του Τομέα της Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, οι οποίοι μου προσέφεραν πολύτιμες γνώσεις και αφιέρωσαν χρόνο οποτεδήποτε ζήτησα την καθοδήγηση ή τη βοήθειά τους. Τους ευχαριστώ πολύ για όλα και πρωτίστως γιατί με έκαναν πάντα να νιώθω ευπρόσδεκτη στο χώρο του Μετεωροσκοπείου.

Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω μεταπτυχιακούς, διδακτορικούς και μεταδιδακτορικούς φοιτητές, και γενικότερα όσους βρίσκονταν στο Μετεωροσκοπείο κατά τη διάρκεια των ετών φοίτησής μου, για την ανταλλαγή γνώσεων και απόψεων πάνω στο αντικείμενο, αλλά και γιατί η παρουσία τους συνέβαλε στη δημιουργία ενός ευχάριστου εργασιακού χώρου.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον αρραβωνιαστικό μου, Θεοτόκη, που βρισκόταν συνεχώς δίπλα μου και με ενθάρρυνε σε αυτή μου την προσπάθεια, και τους γονείς μου, Νίκο και Σοφία που, για ακόμα μια φορά, με την αμέριστη στήριξη και συμπαράστασή τους, με βοήθησαν να εκπληρώσω τις επιθυμίες μου και να ολοκληρώσω τους στόχους μου. Ειδικότερα, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον πατέρα μου, Νικόλαο Αντωνίου, που όντας Μετεωρολόγος αποτέλεσε το εφалτήριο για την επιλογή των σπουδών μου.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

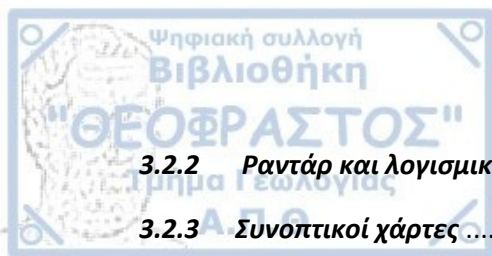
1.1	Γενικά χαρακτηριστικά χαλαζοκαταιγίδων	8
1.2	Τροποποίηση του καιρού	10
1.3	Προηγούμενες μελέτες - Βιβλιογραφική ενημέρωση	13
1.4	Αντικειμενικός σκοπός	15
1.5	Σημασία της μελέτης και Ανασκόπηση	16

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ - ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1	Μοντέλα παλινδρόμησης	18
2.1.1	Γενικά	18
2.1.2	Ανάλυση Συσχέτισης	20
2.1.2.1	Απλή γραμμική συσχέτιση	20
2.1.2.2	Πολλαπλή γραμμική συσχέτιση.....	23
2.1.3	Μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης	24
2.1.3.1	Απλή γραμμική παλινδρόμηση	25
2.1.3.2	Πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση	26
2.1.4	Μη γραμμικά μοντέλα παλινδρόμησης	27
2.2	Επιλογή βέλτιστου μοντέλου	28
2.2.1	Έλεγχος της προσαρμογής του μοντέλου	28
2.3	Επιλογή των μεταβλητών	30

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

3.1	Περιοχή και Περίοδος μελέτης	32
3.2	Δεδομένα	34
3.2.1	Ραδιοβολίσεις	34



3.2.2	Ραντάρ και λογισμικό TITAN	35
3.2.3	Συνοπτικοί χάρτες	38
3.2.4	Ποιοτικός έλεγχος και επεξεργασία	39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

4.1	Η Εξαρτημένη μεταβλητή και η κατανομή της	40
4.2	Οι Ανεξάρτητες μεταβλητές	43
4.2.1	Αστάθεια(ορισμοί)	44
4.2.1.1	Δείκτης Showalter (SI)	45
4.2.1.2	Δείκτης Lifted (LI)	46
4.2.1.3	Δείκτης K (KI)	48
4.2.1.4	Δείκτης CAPE (CAPE)	49
4.2.2	Διαθέσιμη υγρασία	50
4.2.2.1	Σχετική υγρασία στην επιφάνεια(RHSUR)	51
4.2.2.2	Αναλογία μίγματος στην επιφάνεια (MRSUR)	51
4.2.3	Μικροφυσικοί και άλλοι παράγοντες	51
4.2.3.1	Υετίσιμο Ύδωρ (PWAT)	52
4.2.3.2	Ύψος της ισοθέρμου των -5°C	53
4.2.3.3	Δυνητική θερμοκρασία στο μέσο στρώμα ανάμιξης (MLTH)	54

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

5.1	Μια πρώτη προσέγγιση: Συσχετίσεις	55
5.2	Σύνδεση της Εξαρτημένης μεταβλητής με τις ανεξάρτητες	59
5.2.1	Επιλογή των ανεξάρτητων μεταβλητών	59
5.2.2	Επιλογή της αναλυτικής έκφρασης	61
5.2.2.1	Δημιουργία γραμμικού μοντέλου	61
5.2.2.2	Δημιουργία μη γραμμικού μοντέλου	63



5.3	Έλεγχος της ευαισθησίας του μοντέλου	70
5.4	Διαχωρισμός συνοπτικών καταστάσεων	72
5.4.1	Ταξινόμηση ημερών ανά συνοπτική κατάσταση	72
5.4.2	Εφαρμογή μοντέλου σε κάθε συνοπτική κατάσταση	78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

6.1	Συμπεράσματα	83
6.1.1	Γενικά συμπεράσματα	84
6.1.2	Ειδικά συμπεράσματα	84
6.1.3	Επιμέρους συμπεράσματα	86

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	88
----------------	----

ABSTRACT	90
----------------	----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	92
-------------------	----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	99
--------------------	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΧΑΛΑΖΟΚΑΤΑΙΓΙΔΩΝ

Το φαινόμενο της χαλαζόπτωσης έχει αποτελέσει πολλάκις αντικείμενο μελέτης και έρευνας λόγω των καταστροφών που προκάλεσε και συνεχίζει να προκαλεί στις περιουσίες των ανθρώπων και ιδιαιτέρως των αγροτών. Οικίες και καλλιέργειες έχουν υποστεί ζημιές και ζώα έχουν χαθεί, ενώ η εμφάνισή του επηρεάζει όλες σχεδόν τις ανθρώπινες δραστηριότητες.

Για τη καταιγίδα και ειδικότερα για την χαλαζοκαταιγίδα έχουν δοθεί αρκετοί ορισμοί κατά καιρούς. Όπως επισημαίνει ο Huschke (1959) η καταιγίδα αποτελεί θεαματικό και βίαιο φυσικό φαινόμενο και συνοδεύεται από νέφη σωρειτομελανίες, έντονες βροχοπτώσεις, ισχυρές ηλεκτρικές εκκενώσεις και συχνά χαλάζι και ισχυρούς ανέμους.

Ο Glickman (2000) ορίζει ότι ως μετεωρολογικό φαινόμενο, η καταιγίδα αποτελεί την κάθε διαταραχή της κατάστασης της ατμόσφαιρας, ιδιαίτερα όταν αυτή επηρεάζει την επιφάνεια της γης και συνεπάγεται έντονα καιρικά φαινόμενα.

Οι καταιγίδες, ανάλογα με τις ζημιές που προκαλούνται από την κάθε μια, χαρακτηρίζονται ως ανεμοθύελλες, χιονοθύελλες και χαλαζοκαταιγίδες (Τουρναβίτη, 1999).

Σύμφωνα με τον Karacostas (1984) για το χαρακτηρισμό μιας χαλαζοκαταιγίδας, η ανακλαστικότητα που εμφανίζει το ραντάρ θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση με 35dBz μεταξύ των επιπέδων -5 και -30°C.

Οι Byers and Braham (1949) μελέτησαν εις βάθος το φαινόμενο της καταιγίδας και οι έρευνες εξελίχθηκαν ραγδαία με την ανάπτυξη της τεχνολογίας τα επόμενα χρόνια. Οι καιρικές συνθήκες, τα χαρακτηριστικά των καταιγίδων, και ιδιαίτερα των χαλαζοκαταιγίδων, καθώς και όλες οι παράμετροι που τις ελέγχουν και τις επηρεάζουν μελετήθηκαν περαιτέρω από ερευνητές. Ενδεικτικά, ορισμένοι από αυτούς είναι οι Browning and Ludlam (1960), Marwitz (1972) και Wilson et al (1998).

Το χαλάζι είναι στερεή βροχή σε μορφή σφαιρών ή ακανόνιστων όγκων πάγου και παράγεται πάντα από κατακόρυφης ανάπτυξης νέφη και σχεδόν πάντα αυτά είναι σωρειτομελανίες (cumulonimbus). Ο χαλαζόκοκκος, που αποτελεί μια μονάδα του χαλαζιού, μπορεί να έχει είτε σφαιρικό είτε ακανόνιστο σχήμα και η διάμετρός του μπορεί είναι από 5mm και περισσότερο. Όπως επισημαίνει ο Καρακώστας (1999) κάθε χαλαζόκοκκος αποτελείται από στρώματα πάγου τα οποία δημιουργούνται μέσα σε καταιγίδες λόγω των ισχυρών ανοδικών και καθοδικών ρευμάτων. Εξαιτίας αυτών, τα μικρά παγοκρυστάλλια μετακινούνται μέσα στο νέφος με αποτέλεσμα να συναντούν νερό στην υγρή του μορφή το οποίο δημιουργεί το εκάστοτε στρώμα πάγου μόλις βρεθεί σε χαμηλή θερμοκρασία (-40°C). Με την πάροδο του χρόνου και αφού πραγματοποιηθεί πολλές φορές αυτή η διαδικασία, οι χαλαζόκοκκοι αποκτούν σημαντικό μέγεθος. Αυτό, λόγω της επίδρασης της δύναμης της βαρύτητας, είναι υπεύθυνο για την πτώση τους στο έδαφος. Στην περίπτωση που δεν προλάβουν να λιώσουν πριν φτάσουν στο έδαφος σημειώνεται το φαινόμενο της χαλαζόπτωσης. Η διάρκεια του φαινομένου είναι σχετικά μικρή, συνήθως 3-4 λεπτά, και μπορεί να κυμανθεί από λίγα δευτερόλεπτα έως 30-40 λεπτά (Pruppacher and Klett, 1978). Ακόμη, η έκταση που επηρεάζουν είναι περιορισμένη, επιδρώντας σε μια ζώνη πλάτους έως 10km και μήκους έως και τα 100km (Schiesser and Waldvogel, 2000).

Τα αίτια πρόκλησης μιας καταιγίδας μπορεί να είναι θερμικά, δυναμικά ή ορεογραφικά και αντίστοιχα και οι καταιγίδες χαρακτηρίζονται ως θερμικές, δυναμικές ή ορεογραφικές (Μακρογιάννης, 1993).

Κατά την καλοκαιρινή περίοδο και σε περιοχές που το κλίμα χαρακτηρίζεται ως ηπειρωτικό, η υπερθέρμανση του εδάφους μέσω της μικρού μήκους ηλιακής ακτινοβολίας έχει ως αποτέλεσμα να κυριαρχούν θερμές και υγρές αέριες μάζες στην ατμόσφαιρα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Όταν πάνω από αυτές οι αέριες μάζες είναι ξηρές και ψυχρές, οι θερμές τείνουν να ανέλθουν στα ανώτερα στρώματα και προκαλούν αστάθεια. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται οι θερμικές καταιγίδες, με σωρειτόμορφα νέφη που ενδέχεται να αναπτυχθούν και σε σωρειτομελανίες. Αντίθετα με αυτή τη διαδικασία, κατά την οποία σε περιοχές με ηπειρωτικό κλίμα δημιουργούνται θερμικές καταιγίδες το

καλοκαίρι και όχι συχνά τη χειμερινή περίοδο, σε παραθαλάσσιες περιοχές το φαινόμενο των θερμικών καταιγίδων εμφανίζεται το χειμώνα και πιο σπάνια το καλοκαίρι (Browning, 1977). Τέτοιου είδους καταιγίδες είναι δυνατό να προκαλέσουν και μεγάλες καταστροφές εξαιτίας των ισχυρών ανέμων, των ηλεκτρικών εκκενώσεων, των πλημμυρών αλλά και των έντονων χαλαζοπτώσεων με τα οποία συνδέονται.

Η κατηγορία των δυναμικών καταιγίδων μπορεί να προκαλέσει εξίσου σημαντικές καταστροφές. Παρότι, η έντασή τους είναι μικρότερη από αυτή των θερμικών, η διάρκειά τους είναι τέτοια ώστε να αυξηθεί ο κίνδυνος για πλημμύρες. Δυναμικές καταιγίδες εμφανίζονται όταν η περιοχή επηρεάζεται από κάποιο βαρομετρικό χαμηλό. Το ψυχρό μέτωπο του συστήματος συνήθως συναντά θερμότερες αέριες μάζες, με αποτέλεσμα και σε αυτή την περίπτωση τη δημιουργία αστάθειας και εκδήλωση καταιγίδων.

Για τις ορεογραφικές καταιγίδες το αίτιο δημιουργίας τους έγκειται στο ανάγλυφο της περιοχής, ενώ πλέον αντί για δυναμικό γίνεται μηχανικό. Όταν το ανάγλυφο εμποδίζει την κίνηση των θερμών και υγρών αερίων μαζών, με αποτέλεσμα την ανύψωσή τους, προκαλείται αστάθεια και κατακόρυφη ανάπτυξη των νεφών. Τέτοια εμπόδια αποτελούν συνήθως οι ορεινοί όγκοι, στην προσήνεμη πλευρά των οποίων εκδηλώνονται οι καταιγίδες, αλλά και τα νησιά.

1.2 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΑΙΡΟΥ

Πολλές από τις φυσικές καταστροφές που έχουν σημειωθεί, προέρχονται από ακραία καιρικά φαινόμενα. Η αυξητική τάση αυτών με την πάροδο του χρόνου έκανε επιτακτική την ανάγκη εύρεσης και εφαρμογής μεθόδων για την καταστολή τους, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη του τομέα της τροποποίησης του καιρού. Αυτή, παρά το γεγονός ότι προκάλεσε απορίες και ερωτήματα, αναπτύχθηκε και ευνοήθηκε από την εξέλιξη της επιστήμης και της τεχνολογίας (Sax, 1975).

Η Τροποποίηση Καιρού αναφέρεται σε κάθε προσπάθεια που γίνεται ώστε να επιτευχθούν αλλαγές στα φυσικά φαινόμενα (Huschke, 1959). Ανήκει στον κλάδο της επιστήμης της Εφαρμοσμένης Μετεωρολογίας και αναπτύχθηκε με σκοπό τον έλεγχο των καιρικών συνθηκών, ώστε να

διευκολυνθούν οι ανθρώπινες δραστηριότητες (Οργανισμός Ελληνικών Γεωργικών Ασφαλίσεων).

Η έρευνα εξαιρετικών επιστημόνων όπως οι A. Wegener, Tor Bergeron, and Walter Findeisen στη φυσική των νεφών και τη βροχόπτωση οδήγησε στο συμπέρασμα ότι οι διαδικασίες της ατμόσφαιρας ελέγχουν την ύπαρξη πυρήνων σχηματισμού πάγου (Ice-Forming-Nuclei). Από το 1932 ιδρύθηκε το Ινστιτούτο τεχνητής βροχής (Institute of Artificial Rain) στην Σοβιετική Ένωση με σκοπό τη μελέτη για τη δυνατότητα εφαρμογής της τροποποίηση του καιρού (Fedorov, 1974).

Οι εφαρμογές της τροποποίησης του καιρού ξεκίνησαν ήδη από τη δεκαετία του 1940 με την εμφάνιση των πρώτων προγραμμάτων που αφορούσαν την αύξηση της βροχής και του χιονιού, αλλά και τη διάλυση της ομίχλης. Το 1942 κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο ο Findeisen ως μετεωρολόγος του γερμανικού στρατού επιχείρησε να πραγματοποιήσει σπορά των νεφών στην Τσεχοσλοβακία με άμμο, η οποία αποδείχθηκε αναποτελεσματική (Schaefer, 1951).

Ο πόλεμος οδήγησε τις ΗΠΑ στη δημιουργία τμήματος και ομάδας έρευνας με επικεφαλής τον Irving Langmuir μέλος της οποίας ήταν και ο Vincent J. Schaefer. Ο τελευταίος, το 1946 μέσω πειραμάτων που διεξήγαγε σε θαλάμους ανακάλυψε ότι ο ξηρός πάγος, λόγω των εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών στην επιφάνεια του, προκάλεσε παγοποίηση όσων σταγόνων συνάντησε (Schaefer, 1946). Με αυτόν τον τρόπο κατάφερε να παγοποιήσει υπέρψυχρα νέφη και επεδίωξε την απόδειξη αυτού στην ελεύθερη ατμόσφαιρα. Στις 13 Νοεμβρίου του 1946 πραγματοποίησε σπορά νεφών με αεροσκάφος στα βουνά της δυτικής Μασαχουσέτης χρησιμοποιώντας 1,5Kgr ξηρό πάγο (στερεό CO₂). Το αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία χιονονιφάδων μέσα σε χρονικό διάστημα 5 λεπτών οι οποίες διέσχισαν την ξηρά ατμόσφαιρα για 600m (Langmuir et al, 1948).

Ένα άλλο μέλος της ομάδας του Langmuir, ο Bernard Vonnegut το 1947, μέσω της βιβλιογραφικής έρευνας που διεξήγαγε, αποφάσισε ότι το αποδοτικότερο υλικό σποράς ήταν ο ιωδιούχος άργυρος (AgI) λόγω της ομοιότητας της εξαγωνικής κρυσταλλικής του μορφής με αυτή του πάγου. Μέσω εργαστηριακών πειραμάτων απέδειξε ότι όταν η θερμοκρασία ήταν μικρότερη από -5°C κάποια από τα σωματίδια του ιωδιούχου αργύρου έδρασαν ως πυρήνες πάγου (Vonnegut, 1947). Με την εφαρμογή αυτής της θεωρίας στην ατμόσφαιρα και εκτόξευση ιωδιούχου αργύρου από γεννήτριες εδάφους σχηματίστηκαν χιονονιφάδες. Αυτή η ανακάλυψη κατέστησε πρακτικά και οικονομικά δυνατή την τροποποίηση μεγάλου όγκου νεφών.

Από αυτό επωφεληθήκαν αγροτικές κοινότητες, εταιρίες και δήμοι, ενώ έως το 1950 οι περιοχές

των ΗΠΑ στις οποίες εφαρμοζόταν προγράμματα τροποποίησης έφταναν το 10% της συνολικής έκτασης της χώρας. Ταυτόχρονα, ξεκίνησε και η προετοιμασία τέτοιων προγραμμάτων και σε πολλές άλλες χώρες (Dennis, 1980). Τη δεκαετία του 1950, εμφανίστηκαν και τα προγράμματα καταστολής χαλαζιού στην πολιτεία του Τέξας των ΗΠΑ.

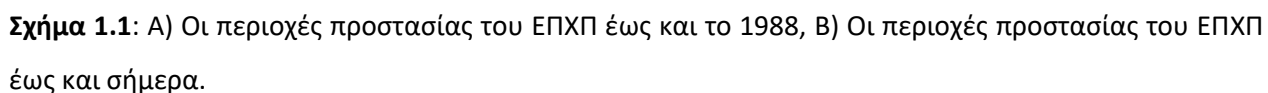
Στη χώρα μας, η έννοια της τροποποίησης του καιρού χρησιμοποιήθηκε από το Εθνικό Πρόγραμμα Χαλαζικής Προστασίας, με σκοπό την καταστολή του χαλαζιού. Για την επίτευξή του, χρησιμοποιείται η μέθοδος σποράς των νεφών που χαρακτηρίζονται ως καταιγιδοφόρα. Ο καθορισμός της ύπαρξης ή μη καταιγιδοφόρου δραστηριότητας πραγματοποιείται κάθε ημέρα με τη χρήση του δείκτη CDC (Convective Day Category) (Strong and Wilson, 1983), ο οποίος κυμαίνεται από -3, για ένδειξη απουσίας δραστηριότητας, έως και +5, για περιπτώσεις που αναμένονται ισχυρές χαλαζοπτώσεις με τη διάμετρο των χαλαζοκόκκων να ξεπερνούν τα 5 εκατοστά.

Σκοπό του Προγράμματος αποτελεί η προστασία των αγροτικών περιοχών από το χαλάζι, το οποίο προκαλεί εκτεταμένες ζημιές στις καλλιέργειες. Το πρόγραμμα υλοποιείται στο Κέντρο Μετεωρολογικών Εφαρμογών (ΚΕ.Μ.Ε.), το οποίο βρίσκεται στο αεροδρόμιο "Μακεδονία" στη Θεσσαλονίκη.

Ο αρμόδιος οργανισμός του ΕΛΓΑ αναφέρει ότι η διαδικασία της σποράς ξεκινά έπειτα από την έγκυρη και έγκαιρη πρόγνωση του φαινομένου από έμπειρους μετεωρολόγους, οι οποίοι εκτελούν την επιχείρηση με τη βοήθεια δύο μετεωρολογικών ραντάρ (Huschke, 1959). Η επιχείρηση προϋποθέτει οι μετεωρολόγοι να κατευθύνουν ειδικά εξοπλισμένα αεροσκάφη εντός των καταιγιδοφόρων νεφών, όπου και πυροδοτούνται φυσίγγια Ιωδιούχου Αργύρου (AgI).

Λόγω του συχνού φαινομένου των χαλαζοπτώσεων στην Κεντρική Μακεδονία, ιδιαίτερα την θερινή περίοδο, ο καθηγητής κ. Θεόδωρος Καρακώστας σχεδίασε το ΕΠΧΠ το 1984 και διετέλεσε επιστημονικός διευθυντής του έως το 1988 (Karacostas, 1984). Το πρόγραμμα εξακολουθεί να εφαρμόζεται από το 1984 μέχρι και σήμερα με αντικειμενικό σκοπό την προστασία των καλλιεργειών από το χαλάζι.

Από την έναρξη του μέχρι και το 1988 εκτός από την επιχειρησιακή του λειτουργία χρησιμοποιήθηκε και για έρευνα, προστατεύοντας περίπου 4000km². Η συνολική περιοχή προστασίας απαρτιζόταν από την Περιοχή 1, 2 και 3 (Σχήμα 1.1.Α). Στην πρώτη περιοχή Ημαθίας-Πέλλας λειτούργησε ως ερευνητικό, ενώ στις περιοχές Σερρών-Δράμας και Καρδίτσας Τρικάλων ως



Το χαλάζι είναι ένας από τους σημαντικότερους φυσικούς κινδύνους που πλήττουν πολλές περιοχές στον κόσμο αλλά και την Ελλάδα. Λόγω αυτού, το φαινόμενο της χαλαζόπτωσης έχει μελετηθεί εις βάθος στο παρελθόν και ορισμένες από αυτές τις έρευνες αποτέλεσαν πηγή πληροφοριών και για την παρούσα διατριβή ειδίκευσης. Στοιχεία και έννοιες που αξιοποιήθηκαν και συνδέονται με τις χαλαζοπτώσεις αφορούν τους δείκτες αστάθειας, τις συνοπτικές καταστάσεις, το γραμμικό ή μη γραμμικό μοντέλο και τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν μέχρι στιγμής.

- 13 -

Όσον αφορά την πρόγνωση των χαλαζοκαταιγίδων στη Βόρειο Ελλάδα οι μελέτες των Φλόκα και Καρακώστα (1988) και Karacostas et al (1991) παρείχαν δείκτες μέσω της συσχέτισης της ανακλαστικότητας με τις διάφορες παραμέτρους που αφορούν σε συνοπτικά, δυναμικά και θερμοδυναμικά στοιχεία της ατμόσφαιρας. Έπειτα από τη μελέτη 13 παραμέτρων, προέκυψαν δύο δείκτες, οι οποίοι ονομάστηκαν FK και TK-4.

Το 1995 σχηματίστηκε αλγόριθμος με σκοπό την πρόγνωση του μεγέθους των χαλαζοκόκκων από τους Billet et al (1995-1996). Ο αλγόριθμος συμπεριλάμβανε πέντε μεταβλητές, εκ των οποίων ως εξαρτημένη χρησιμοποιήθηκε η διάμετρος των χαλαζοκόκκων. Οι τέσσερις ανεξάρτητες μεταβλητές ήταν ο VIL (Vertical Integrated Liquid), FRZLVL (επίπεδο παγοποίησης), η θερμοκρασία στο επίπεδο των 850hPa και (mean storm-relative inflow) στο στρώμα από την επιφάνεια έως τα 2km.

Η Στολάκη (2004) ασχολήθηκε και αυτή με τη μελέτη του πολύπλοκου και πολυσύνθετου φαινομένου της χαλαζοκαταιγίδας και την ανάπτυξη μιας σχέσης ανάμεσα στις συνθήκες που επικρατούν στην ατμόσφαιρα και της χαλαζόπτωσης. Σε αυτήν την προσπάθεια δημιουργήθηκε ένας αλγόριθμος της μέγιστης ανακλαστικότητας ως γραμμικός συνδυασμός πέντε ανεξάρτητων μεταβλητών. Αυτές ήταν η I-theta όπως ορίστηκε το 1992 από τον Morgan (1992), ο δείκτης ενέργειας EI, ο δείκτης FI ο οποίος είναι μια συνάρτηση των γεωδυναμικών υψών των 850hPa, 700hPa και 500hPa, ο δείκτης υγρασίας HI και το υετίσιμο νερό μεταξύ της επιφάνειας και του επιπέδου των 500hPa.

Οι Lopez et al (2007) μελέτησαν διάφορες μετεωρολογικές παραμέτρους και επιλέχθηκαν επτά από αυτές για τη δημιουργία του αλγορίθμου. Οι επτά μεταβλητές ήταν ο δείκτης TT, η ταχύτητα του ανέμου στα 500hPa και η ταχύτητα του ανέμου στα 850hPa, το ύψος των 0°C του υγρού θερμομέτρου, το ύψος του επιπέδου CCL (convective condensation level), η θερμοκρασία του σημείου δρόσου στα 850hPa και ο δείκτης T^2 GUST (μέγιστης δυνατής ριπής). Η πιθανότητα ανίχνευσης της χαλαζοκαταιγίδας ανήλθε στο 0,87.

Στο άρθρο των Garcon et al (2015), αφού επιλέχθηκαν οι καλύτερες προγνωστικές παράμετροι δημιουργήθηκε μια λογιστική παλινδρόμηση, για το διαχωρισμό των ημερών με χαλαζοπτώσεις και αυτών χωρίς, έχοντας ως εξαρτημένη μεταβλητή την ανακλαστικότητα. Έπειτα από τον έλεγχο 31 δεικτών αστάθειας, οι πέντε που χρησιμοποιήθηκαν στον αλγόριθμο, και μετέπειτα στη λογιστική εξίσωση, ήταν ο Showalter (SI), η ταχύτητα του ανέμου στα 500hPa (SPD500), το σημείο δρόσου στα 850hPa (Td850), σχετική ανακλαστικότητα από 0 έως 3km (SREH3km) και το ύψος στο οποίο η θερμοκρασία του υγρού θερμομέτρου πέφτει κάτω από τους 0°C (WBZ).

Σύμφωνα με τους Melcon et al (2017) παρατέθηκε με τον ίδιο τρόπο ένας αλγόριθμος. Η εξαρτημένη μεταβλητή ήταν η ανακλαστικότητα ενώ ως ανεξάρτητες χρησιμοποιήθηκαν με σειρά σπουδαιότητας ο Showalter (SI), το σημείο δρόσου στα 850hPa (Td850) και low-top convection potential (TQ).

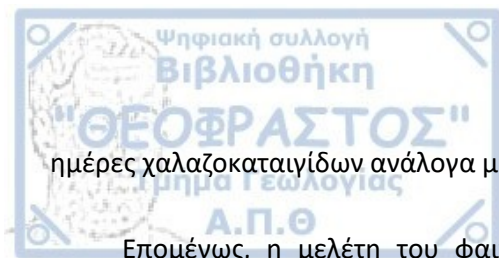
Οστόσο, παρά τις πολυάριθμες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν το φαινόμενο χρήζει περαιτέρω μελέτης λόγω της πολυπλοκότητάς του αλλά και των πολλών παραγόντων που το επηρεάζουν. Το χαλάζι αποτελεί φαινόμενο μικρής κλίμακας με ραγδαία ανάπτυξη και εξαρτάται από μικροφυσικές διεργασίες. Έτσι, η πρόβλεψή του πρέπει να συμπεριλαμβάνει αυτές τις διεργασίες, αλλά και τις ιδιαιτερότητες της κάθε περιοχής. Επομένως, η έρευνα για την περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας και η ανάλυση των ετών 2008, 2009 και 2010 θα προσφέρουν καινούρια δεδομένα στο εγχείρημα της πρόγνωσης.

1.4 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΟΣ ΣΚΟΠΟΣ

Η έρευνα που διεξάχθηκε για την παρούσα διατριβή ειδίκευσης βασίζεται σε ημέρες χαλαζοκαταιγίδων στην περιοχή της κεντρικής Μακεδονίας για τα έτη 2008, 2009 και 2010. Σε αυτή αναλύονται οι διάφορες παράμετροι που επηρεάζουν το φαινόμενο των χαλαζοπτώσεων και ακολουθούνται στατιστικές διαδικασίες με σκοπό την όσο το δυνατόν ακριβέστερη πρόγνωση του φαινομένου.

Αρχικά, παρουσιάζονται οι συνθήκες που ευνοούν την ανάπτυξη του χαλαζιού. Αυτές οι συνθήκες μπορούν να γίνουν αντιληπτές με τη βοήθεια δεικτών και μετεωρολογικών παραμέτρων, οι οποίοι και αναλύονται. Ακολουθεί στατιστική μελέτη με σκοπό την εύρεση των μεταξύ τους συσχετίσεων, αλλά και των παραμέτρων που θεωρούνται οι πιο αντιπροσωπευτικές ως προς τη σφοδρότητα των χαλαζοκαταιγίδων.

Αφού επιλεχθούν οι βασικότερες, σχηματίζεται ο αλγόριθμος πρόγνωσης, ο οποίος ελέγχεται μέσω της εξέτασης των αποτελεσμάτων του και της απόκλισης αυτών από τις πραγματικές μετρήσεις που κατέγραψε το μετεωρολογικό ραντάρ. Τέλος, ο αλγόριθμος εφαρμόζεται και ξεχωριστά για τις



ημέρες χαλαζοκαταιγίδων ανάλογα με τις συνοπτικές καταστάσεις στις οποίες εντάσσονται.

Επομένως, η μελέτη του φαινομένου επιτρέπει τη διεξαγωγή συμπερασμάτων ως προς τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα και η απόπειρα πρόγνωσής του προσφέρει τη δυνατότητα μελλοντικής διερεύνησης των χαλαζοκαταιγίδων άλλων περιόδων και άλλων περιοχών πέραν της Κεντρικής Μακεδονίας.

1.5 ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Επιδίωξη, μέσω της παρούσας διατριβής ειδίκευσης, αποτελεί η μελέτη του φαινομένου των χαλαζοπτώσεων λόγω του μεγάλου ενδιαφέροντος που παρουσιάζει ο τρόπος σχηματισμού και ανάπτυξής του αλλά και των ζημιών που δύναται να προκαλέσει. Για την αποφυγή αυτών ένας από τους στόχους της εργασίας είναι η όσο το δυνατόν ακριβέστερη πρόγνωση των χαλαζοπτώσεων. Για την επίτευξη αυτού του στόχου επιλέχθηκε ένας αλγόριθμος, με τον οποίο πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση πολλών παραγόντων για τη μελέτη της συμπεριφοράς μιας εξαρτημένης μεταβλητής.

Εκτός από τη δυνατότητα πρόγνωσης ο αλγόριθμος προσφέρεται και για την αξιολόγηση της συνεισφοράς της κάθε μιας ανεξάρτητης μεταβλητής. Αφού έχει κατασκευαστεί το μη γραμμικό μοντέλο, η επίδραση στην ανεξάρτητη μεταβλητή καθεμιάς από τις παραμέτρους ορίζεται από το συντελεστή τους.

Η διατριβή ειδίκευσης, αποτελούμενη από 6 κεφάλαια, περιέχει την περιγραφή των μεθόδων και διαδικασιών που επιλέχθηκαν να ακολουθηθούν καθώς και το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για την κατανόηση του φαινομένου.

Στο 2^ο κεφάλαιο αναλύονται οι όροι της ανάλυσης συσχέτισης και των μοντέλων παλινδρόμησης και διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό την επιλογή του βέλτιστου μοντέλου. Ταυτόχρονα, αναφέρονται οι έλεγχοι που πρέπει να διεξάγονται ώστε το μοντέλο να αποδειχθεί αποτελεσματικό και ο τρόπος επιλογής των σωστών μεταβλητών, τόσο με βάση αριθμητικά όσο και μετεωρολογικά κριτήρια.

Έπειτα, στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη συλλογή των δεδομένων. Αποσαφηνίζεται τόσο η περιοχή όσο και η περίοδος την οποία αντιπροσώπευαν. Αφού καθορίστηκαν αυτά τα όρια, παρουσιάστηκαν και τα μέσα από τα οποία προήλθαν τα δεδομένα, ενώ αναλύθηκε και η διαδικασία του ποιοτικού ελέγχου αυτών.

Στην πορεία, στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των μετεωρολογικών παραμέτρων που επηρέασαν το φαινόμενο και αφορούν την αστάθεια της ατμόσφαιρας, τη διαθέσιμη υγρασία αλλά και άλλους δείκτες και μικροφυσικούς παράγοντες. Για κάθε έναν από αυτούς γίνεται σύντομη περιγραφή της έκφρασής τους αλλά και οι κρίσιμες τιμές που έχουν ανάλογα με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν.

Στο 5^ο κεφάλαιο περιγράφεται η δημιουργία του αλγορίθμου. Αποτυπώνονται τα αριθμητικά αποτελέσματα της ανάλυσης συσχέτισης και αποδίδεται η μορφή του αρχικά γραμμικού μοντέλου αλλά και του τελικού και αποδοτικότερου μη γραμμικού μοντέλου. Ακολουθεί η επαλήθευση με δεδομένα ημερών με χαλαζοκαταιγίδες που δεν χρησιμοποιήθηκαν στη δημιουργία του αλγορίθμου και ο έλεγχος της ευαισθησίας του μοντέλου με αλλαγή στον αριθμό των ανεξάρτητων μεταβλητών. Στο κεφάλαιο αυτό αποδίδονται και τα αποτελέσματα του μοντέλου για τις ημέρες με ίδια συνοπτική κατάσταση, μελετώντας έξι εξ αυτών.

Τέλος, στο 6^ο κεφάλαιο γίνεται η διεξαγωγή των συμπερασμάτων και δίνεται μια ένδειξη των δυνατοτήτων και προοπτικών που υπάρχουν, ώστε να πραγματοποιηθούν και μετέπειτα εις βάθος μελέτες όσον αφορά την εξέλιξη του αλγορίθμου και συνεπώς και της πρόγνωσης του φαινομένου των χαλαζοκαταιγίδων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ - ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ

2.1.1 Γενικά

Ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis) ονομάζεται η διαδικασία μέσω της οποίας εξετάζεται το είδος της σχέσης που έχουν δύο ή περισσότερες μεταβλητές μεταξύ τους, ώστε με τη βοήθεια των ανεξαρτήτων μεταβλητών να γίνει πρόγνωση-πρόβλεψη της εξαρτημένης μεταβλητής. Όταν η εκτιμώμενη μεταβλητή (εξαρτημένη) υπολογίζεται συναρτήσει μιας μόνο ανεξάρτητης μεταβλητής, τότε η μέθοδος ονομάζεται απλή παλινδρόμηση, ενώ όταν υπολογίζεται συναρτήσει περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών, τότε αυτή ονομάζεται πολλαπλή παλινδρόμηση. Υπάγεται στον κλάδο της Στατιστικής και ο όρος "regression" αρχικά υιοθετήθηκε από τον Galton (1885).

Τα μοντέλα αποτελούν εξέλιξη των μαθηματικών εκφράσεων με τις οποίες περιγράφεται η συμπεριφορά μιας τυχαίας μεταβλητής. Αυτή η μεταβλητή ονομάζεται εξαρτημένη και συμβολίζεται με το γράμμα Y . Ουσιαστικά, τα μοντέλα εξετάζουν τη σημασία των αλλαγών της εξαρτημένης μεταβλητής που επιφέρουν οι αλλαγές των συνθηκών. Οι υπόλοιπες μεταβλητές, που χρησιμοποιούνται από το μοντέλο, παρέχουν πληροφορίες για τη συμπεριφορά της εξαρτημένης μεταβλητής, λειτουργούν ως προγνωστικές, ονομάζονται ανεξάρτητες και συμβολίζονται με το γράμμα X .

Ο βαθμός πολυπλοκότητας των μαθηματικών μοντέλων εξαρτάται από το σκοπό για τον οποίο το εκάστοτε μοντέλο δημιουργείται και από το πόσο σύνθετες είναι οι διαδικασίες που περιγράφει. Τα

μαθηματικά αυτά μοντέλα, στην περίπτωση που οι ανεξάρτητες μεταβλητές λειτουργούν ως απλοί συντελεστές της εξαρτημένης ή ως συναρτήσεις αυτής, αναφέρονται ως μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης.

Η πιο απλή μορφή παλινδρόμησης είναι η θεώρηση ύπαρξης γραμμικής σχέσης - και ως προς τις μεταβλητές και ως προς τους συντελεστές - μεταξύ της εξαρτημένης και των ανεξάρτητων μεταβλητών. Στην περίπτωση ύπαρξης μόνο μίας ανεξάρτητης μεταβλητής, το μοντέλο είναι το απλούστερο και περιγράφεται από τη σχέση:

$$Y = \alpha + \beta X \quad (2.1)$$

Η συνάρτηση αυτή λέγεται προσδιοριστική (deterministic), γιατί η εξαρτημένη μεταβλητή προσδιορίζεται ακριβώς από την ανεξάρτητη. Συχνά, όμως, δεν υπάρχει μια τέτοια ακριβής σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών, δηλαδή περισσότερες από μία τιμές του Y προκύπτουν για μία τιμή του X . Τότε το μοντέλο παλινδρόμησης περιγράφεται από μια σχέση προσεγγιστική, δηλαδή μια συνάρτηση στοχαστική (stochastic), της οποίας η μορφή δίνεται από τη σχέση:

$$\hat{Y}_X = a' + bX \quad (2.2)$$

όπου τα a' και b είναι εκτιμητές των α και β . Έτσι, η εξαρτημένη μεταβλητή δεν προσδιορίζεται ακριβώς, αλλά εκτιμάται.

Η ακριβής τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής για δεδομένο X είναι η:

$$Y = \hat{Y}_X + e = a' + bX + e \quad (2.3)$$

η οποία μπορεί να υπολογιστεί μόνο αν είναι γνωστό το σφάλμα e . Σε μια τέτοια σχέση η ανάλυση παλινδρόμησης προσδιορίζει τις παραμέτρους μεταξύ της εξαρτημένης και της ανεξάρτητης μεταβλητής, έτσι ώστε το σφάλμα e να είναι το ελάχιστο δυνατό.

Γενικά, η ανάλυση παλινδρόμησης έχει ως σκοπό τον εντοπισμό και προσδιορισμό μιας σχέσης της μορφής:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k) + e \quad (2.4)$$

που να συνδέει την προβλεπόμενη μεταβλητή με τις ανεξάρτητες μεταβλητές (Κάτος και Πέκος, 1990), έτσι ώστε το σφάλμα e να είναι ελάχιστο.

2.1.2 Ανάλυση Συσχέτισης

Η ανάλυση συσχέτισης έχει ως σκοπό τη δημιουργία ενός γενικού δείκτη που θα αποτελεί μια ένδειξη για το πόσο ισχυρή είναι η σχέση μεταξύ της εξαρτημένης και των ανεξάρτητων μεταβλητών, κι επομένως πόσο καλή είναι η προσαρμογή της γραμμής παλινδρόμησης στα δεδομένα του δείγματος. Ένας τέτοιος δείκτης είναι ο συντελεστής προσδιορισμού, που συμβολίζεται με R^2 , και κατ' επέκταση ο συντελεστής συσχέτισης, που συμβολίζεται με R . Οι συντελεστές αυτοί ελέγχουν την ύπαρξη ή όχι γραμμικής σχέσης μεταξύ της εξαρτημένης και των ανεξάρτητων μεταβλητών (Kohler, 1988).

2.1.2.1 Απλή γραμμική συσχέτιση

Στην περίπτωση που η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι μόνο μία (απλή συσχέτιση), ο συντελεστής προσδιορισμού ορίζεται ως ο λόγος της μεταβλητότητας της εξαρτημένης μεταβλητής Y που οφείλεται στη σχέση της με την ανεξάρτητη μεταβλητή X , όπως αυτή εκφράζεται από τη γραμμή παλινδρόμησης, προς την συνολική μεταβλητότητα της Y :

$$R^2 = \frac{\text{ερμηνευόμενη μεταβλητότητα}}{\text{συνολική μεταβλητότητα}}$$

Δηλαδή, ο συντελεστής προσδιορισμού εκφράζει το ποσοστό της συνολικής μεταβλητότητας που ερμηνεύεται από το γραμμικό μοντέλο.

Για μία συγκεκριμένη τιμή του X , η συνολική απόκλιση της αντίστοιχης πραγματικής τιμής του Y από το μέσο $\bar{Y}$ είναι το άθροισμα της ερμηνευόμενης από το μοντέλο και της μη ερμηνευόμενης από το μοντέλο απόκλισης:

$$Y_i - \bar{Y} = (\hat{Y}_{Xi} - \bar{Y}) + (Y_i - \hat{Y}_{Xi}) \quad (2.5)$$

Η συνολική μεταβλητότητα του Y είναι το άθροισμα των τετραγώνων των συνολικών αποκλίσεων των τιμών του Y :

$$SST = \sum_i (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (2.6)$$

Αντίστοιχα η ερμηνευόμενη μεταβλητότητα του Y είναι το άθροισμα των τετραγώνων των ερμηνευόμενων αποκλίσεων των τιμών του Y :

$$SSR = \sum_i (\hat{Y}_{Xi} - \bar{Y})^2 \quad (2.7)$$

και η μη ερμηνεύσιμη μεταβλητότητα του Y το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων στην εκτίμηση του Y , δηλαδή των μη ερμηνεύσιμων αποκλίσεων των τιμών του Y :

$$SSE = \sum_i (Y_i - \hat{Y}_{xi})^2 \quad (2.8)$$

Με βάση τα παραπάνω ο συντελεστής προσδιορισμού δίνεται από τη σχέση:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{\sum_i (\hat{Y}_{xi} - \bar{Y})^2}{\sum_i (Y_i - \bar{Y})^2} = 1 - \frac{SSE}{SST} = \frac{\sum_i (Y_i - \hat{Y}_{xi})^2}{\sum_i (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2.9)$$

Ωστόσο, ο συντελεστής προσδιορισμού υπολογίζεται πιο εύκολα από τη σχέση:

$$R^2 = \frac{a' \sum_i Y_i + b \sum_i X_i Y_i - n \bar{Y}^2}{\sum_i Y_i^2 - n \bar{Y}^2} \quad (2.9)'$$

Από τον ορισμό του R^2 γίνεται φανερό ότι: $0 \leq R^2 \leq 1$. Όσο πιο κοντά στο 1 είναι το R^2 τόσο πιο καλή είναι η προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα.

Ένας άλλος δείκτης του βαθμού της γραμμικής σχέσης μεταξύ δύο μεταβλητών είναι η τετραγωνική ρίζα του συντελεστή προσδιορισμού:

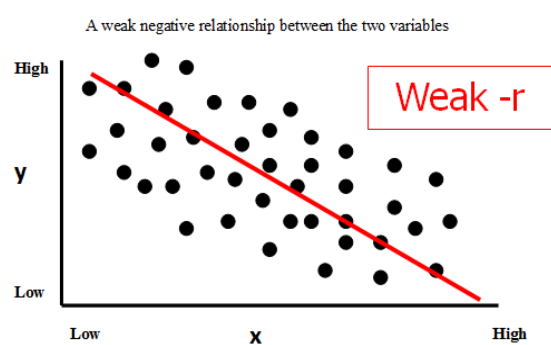
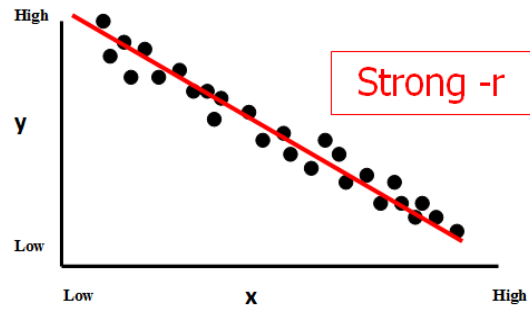
$$R = \sqrt{R^2} \quad (2.10)$$

Αποδεικνύεται ότι το R ισούται με το συντελεστή συσχέτισης r των δύο μεταβλητών δηλαδή:

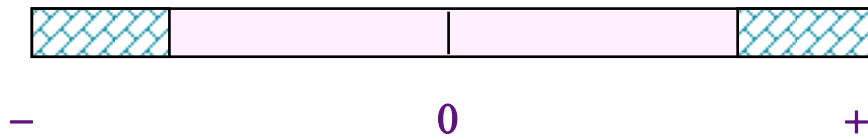
$$R = r = \frac{s_{XY}}{s_X s_Y} = \frac{\sum_i X_i Y_i - n \bar{X} \bar{Y}}{\sqrt{\sum_i X_i^2 - n \bar{X}^2} \sqrt{\sum_i Y_i^2 - n \bar{Y}^2}} \quad (2.10)'$$

απ' όπου το R μπορεί να υπολογιστεί χωρίς να προηγηθεί ανάλυση παλινδρόμησης. Ο συντελεστής συσχέτισης παίρνει τιμές $-1 \leq r \leq 1$. Η τιμή -1 δηλώνει τέλεια αρνητική γραμμική συσχέτιση, η τιμή 1 δηλώνει τέλεια θετική γραμμική συσχέτιση και η τιμή 0 δηλώνει απουσία γραμμικής σχέσης μεταξύ των δύο μεταβλητών. Οι ενδιάμεσες τιμές δηλώνουν αντίστοιχες καταστάσεις.

Τα παραπάνω, καθώς και το διάγραμμα διασποράς (Scatterplot), που παρέχει τη δυνατότητα αναζήτησης της φύσης και της έντασης της συσχέτισης που υπάρχει μεταξύ δύο μεταβλητών απεικονίζονται στα Σχήματα 2.1 και 2.2.



Ισχυρή θετική
σχέση



2.1.2.2 Πολλαπλή γραμμική συσχέτιση

Η πολλαπλή γραμμική συσχέτιση εφαρμόζεται στην περίπτωση της αναζήτησης της φύσης και της έντασης της συσχέτισης μεταξύ μιας εξαρτημένης Y και περισσότερων από μια ανεξάρτητων μεταβλητών $X_1, X_2, \dots, X_n$. Για τον προσδιορισμό αυτής της σχέσης χρησιμοποιείται ο συντελεστής πολλαπλής συσχέτισης που δηλώνει τη γραμμική εξάρτηση της εξαρτημένης μεταβλητής από τις ανεξάρτητες.

Επομένως, κατ' αντιστοιχία με το απλό γραμμικό μοντέλο, ο πολλαπλός συντελεστής προσδιορισμού εκφράζει την αναλογία της συνολικής μεταβλητότητας των τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής Y που ερμηνεύεται από το γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης του Y ως προς τις ανεξάρτητες μεταβλητές $X_1, X_2, \dots, X_k$. Συγκεκριμένα, δίνεται από τη σχέση (2.11), όπου ο δείκτης X_i υποδηλώνει την i (τυχαία) k -άδα τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών $X_1, X_2, \dots, X_k$.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{\sum_i (\hat{Y}_{X_i} - \bar{Y})^2}{\sum_i (Y_i - \bar{Y})^2} = 1 - \frac{SSE}{SST} = \frac{\sum_i (Y_i - \hat{Y}_{X_i})^2}{\sum_i (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2.11)$$

Για μικρά δείγματα ένα καλύτερο μέτρο της ισχύος της γραμμικής σχέσης μεταξύ δύο μεταβλητών είναι ο διορθωμένος συντελεστής προσδιορισμού (adjusted coefficient of determination), ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{SSE / (n - k - 1)}{SST / (n - 1)} = \frac{s_Y^2 - s_{\hat{Y}_{12, \dots, k}}^2}{s_Y^2} \quad (2.12)$$

Στην περίπτωση ενός μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης η ενδεχόμενη βελτίωση που επιφέρει στο μοντέλο η προσθήκη κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής μπορεί να φανεί από την αντίστοιχη αύξηση του συντελεστή προσδιορισμού, αλλά κι από έναν άλλο δείκτη, τον μερικό συντελεστή προσδιορισμού. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που το αρχικά απλό γραμμικό μοντέλο εμπλουτίζεται με μία νέα ανεξάρτητη μεταβλητή, ο μερικός συντελεστής προσδιορισμού δίνεται από τη σχέση:

$$R_{Y_{2-1}}^2 = \frac{R_{Y_{-12}}^2 - R_{Y_{-1}}^2}{1 - R_{Y_{-1}}^2} \quad (2.13)$$

όπου ο δείκτης Y_{-12} δηλώνει ότι λαμβάνεται υπόψη η αμοιβαία επίδραση και των δύο ανεξάρτητων μεταβλητών, ενώ ο δείκτης Y_{-1} δηλώνει ότι λαμβάνεται υπόψη μόνο η πρώτη ανεξάρτητη μεταβλητή. Ο

συντελεστής αυτός παίρνει τιμές από -1 ως $+1$. Για γραμμικά μοντέλα περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών, ο μερικός συντελεστής προσδιορισμού ορίζεται ανάλογα.

Κατά ανάλογο τρόπο ορίζονται και οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης (απλός, διορθωμένος, μερικός), με αντίστοιχη φυσική σημασία.

Πρέπει να τονιστεί πως, όπως προαναφέρθηκε, οι παραπάνω συντελεστές ελέγχουν την ύπαρξη και ισχύ ενδεχόμενης γραμμικής σχέσης μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής και μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών: αυτό σημαίνει ότι σε περίπτωση που οι παραπάνω δείκτες είναι πολύ κοντά στο 0, δεν υπάρχει μεν γραμμική σχέση, αλλά δεν αποκλείεται να υπάρχει άλλου είδους σχέση μεταξύ της εξαρτημένης και των ανεξάρτητων μεταβλητών.

Η συσχέτιση δύο μεταβλητών μπορεί να εμφανίζεται ισχυρή, αλλά να μην υπάρχει στην πραγματικότητα σχέση μεταξύ τους, δηλαδή οι υψηλές τιμές των συντελεστών προσδιορισμού και συσχέτισης να είναι τυχαίο γεγονός. Γι' αυτό είναι απαραίτητο να ελέγχεται και η σχέση των παραμέτρων που συσχετίζονται με βάση φυσικά κριτήρια.

Είναι καλό να ελέγχεται κάθε φορά η στάθμη σημαντικότητας των παραπάνω συντελεστών, ώστε να αποφεύγονται εσφαλμένες ή μη σημαντικές στατιστικές τιμές που οφείλονται κυρίως στο μέγεθος του δείγματος. Στην επιστήμη της Μετεωρολογίας ικανοποιητική στάθμη σημαντικότητας θεωρείται η $\alpha=0.05$.

2.1.3 Μοντέλα Γραμμικής Παλινδρόμησης

Η γραμμική παλινδρόμηση είναι η πιο απλή μορφή παλινδρόμησης μεταξύ μίας εξαρτημένης μεταβλητής και μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών.

Το γενικό μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης εκφράζεται από την εξίσωση:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k + e$$

ή

(2.14)

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k$$

στην προσδιοριστική και τη στοχαστική της μορφή αντίστοιχα. Η παράμετρος b_0 είναι η εκτιμώμενη τιμή του Y για μηδενικές τιμές των X_i . Οι παράμετροι b_i είναι οι μερικές παράγωγοι της μεταβλητής Y ως προς

τις αντίστοιχες μεταβλητές X_i , δηλαδή δηλώνουν τη μεταβολή του Y ως προς την X_i μεταβλητή όταν οι υπόλοιπες ανεξάρτητες μεταβλητές διατηρούνται σταθερές. Το σφάλμα e είναι η απόκλιση της πραγματικής από την εκτιμώμενη απ' το μοντέλο τιμή.

Το γραμμικό μοντέλο είναι η πιο απλή μορφή παλινδρόμησης. Γι' αυτό χρησιμοποιείται συχνά και αποτελεί την πρώτη επιλογή μεταξύ των μοντέλων παλινδρόμησης. Βέβαια, πολλές φορές συμβαίνει να μην είναι η καταλληλότερη ή ακόμα να μην είναι καν κατάλληλη προσαρμογή για τα δεδομένα από τα οποία προήλθε. Κάτι τέτοιο μπορεί να διερευνηθεί με μια σειρά ελέγχων υποθέσεων, έτσι ώστε να υπάρχει επίγνωση του βαθμού προσαρμογής του στα δεδομένα ή να αποφευχθεί λανθασμένη αποδοχή του.

Τα δεδομένα συνήθως αποτελούν ένα μικρό μέρος του πληθυσμού. Έτσι, υπάρχει το ενδεχόμενο το μοντέλο παλινδρόμησης του δείγματος να διαφέρει σημαντικά από το αντίστοιχο ολόκληρου του πληθυσμού. Για να μην εξάγονται λανθασμένα συμπεράσματα, για την ανάπτυξη ενός γραμμικού μοντέλου θεωρείται ότι πληρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις (Kohler, 1988).

Οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι γνωστές, είτε από μετρήσεις είτε από υπολογισμούς και δεν υπάρχει σφάλμα στις τιμές τους. Δεν υπάρχει ακριβής γραμμική σχέση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών.

Το δείγμα είναι τυχαίο και αντιπροσωπευτικό. Επομένως οι παρατηρηθείσες τιμές του Y είναι στατιστικά ανεξάρτητες μεταξύ τους. Μάλιστα, η εξαρτημένη μεταβλητή Y ακολουθεί κανονική κατανομή με μία θεωρητική μέση τιμή $\mu_{Y \cdot 12 \dots k}$ και μια θεωρητική τυπική απόκλιση $\sigma_{Y \cdot 12 \dots k}$ κι αυτό ισχύει για κάθε θεωρητική κατανομή πιθανότητας του Y . Όλοι οι θεωρητικοί μέσοι όροι $\mu_{Y \cdot 12 \dots k}$ πληρούν τη σχέση: $E(Y) = \mu_{Y \cdot 12 \dots k} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k$, όπου τα β_i είναι οι πραγματικοί συντελεστές.

Όσον αφορά τα σφάλματα e : ακολουθούν κανονική κατανομή $N(0, \sigma^2)$. Η αυτοσυσχέτισή τους και η συσχέτιση με τις ανεξάρτητες μεταβλητές είναι μηδενική.

2.1.3.1 Απλή γραμμική παλινδρόμηση

Το απλό γραμμικό μοντέλο είναι η απλούστερη μορφή γραμμικής παλινδρόμησης: η εκτιμώμενη μεταβλητή εξαρτάται μόνο από μία προβλέπουσα μεταβλητή:

$$\hat{Y} = a' + bX_1$$

και στο επίπεδο αναπαριστά μία ευθεία.

Μία πρώτη και γενική ένδειξη για το αν ένα γραμμικό μοντέλο μπορεί να προσαρμοστεί στα δεδομένα ενός συγκεκριμένου δείγματος είναι το διάγραμμα διασποράς (scatterplot), ενώ μια πιο σαφή ένδειξη δίνουν οι συντελεστές συσχέτισης και προσδιορισμού. Στο διάγραμμα διασποράς κάθε παρατήρηση αντιστοιχίζεται, σ' ένα ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων, σε ένα σημείο με συντεταγμένες (x,y). Αν το σμήνος των σημείων έχει σχήμα κεκλιμένης έλλειψης, τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ των X και Y (Κολυβά-Μαχαίρα και Μπόρα-Σέντα, 1998). Είναι δυνατόν να χαραχθεί πάνω στο διάγραμμα διασποράς κάποια ευθεία που να ταιριάζει στα δεδομένα και από κει να υπολογιστούν οι παράμετροι αυτής της ευθείας, δηλαδή το απλό γραμμικό μοντέλο. Πέρα, όμως από τη γραφική μέθοδο, υπάρχουν πιο ακριβείς μέθοδοι υπολογισμού της ευθείας που προσαρμόζεται στα δεδομένα. Ορισμένες από αυτές είναι: η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων, η γενικευμένη μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων, όταν δεν ισχύουν βασικές προϋποθέσεις του γραμμικού μοντέλου παλινδρόμησης, η μέθοδος των τεχνητών μεταβλητών (instrumental variables method) και η μέθοδος των κυρίων συνιστωσών (principal components method).

Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων συνίσταται στον υπολογισμό των παραμέτρων α' και b έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων e, δηλαδή των αποκλίσεων των εκτιμώμενων τιμών από τις πραγματικές τιμές του Y. Στην περίπτωση του απλού γραμμικού μοντέλου οι συντελεστές του, όπως προκύπτουν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, δίνονται από τις σχέσεις:

$$b = \frac{\sum_i X_i Y_i - n \bar{X} \bar{Y}}{\sum_i X_i^2 - n \bar{X}^2}, \quad a' = \bar{Y} - b \bar{X} \quad (2.15)$$

Οι α' και b που προκύπτουν είναι αμερόληπτοι γραμμικοί εκτιμητές και παρουσιάζουν τη μικρότερη διακύμανση.

2.1.3.2 Πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση

Το γραμμικό μοντέλο με μία ανεξάρτητη μεταβλητή είναι το πιο απλό μοντέλο. Ωστόσο, όπως σε πολλές περιπτώσεις, έτσι και στην περίπτωση πρόβλεψης κάποιου μετεωρολογικού φαινομένου όπως είναι η χαλαζοκαταιγίδα, η εξαρτημένη μεταβλητή επηρεάζεται από μια σειρά παραμέτρων. Έτσι, ένα

απλό γραμμικό μοντέλο δεν μπορεί παρά να είναι μια ελλιπής ή και λανθασμένη απεικόνιση της πραγματικότητας.

Η ανάγκη να υπεισέλθουν στην εκτίμηση του Y περισσότερες από μία ανεξάρτητες μεταβλητές οδηγεί στο γραμμικό μοντέλο πολλαπλής παλινδρόμησης. Η χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων οδηγεί σε μια ικανοποιητική εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου. Τότε, ο πίνακας στήλη B των εκτιμώμενων συντελεστών $b_0, b_1, \dots, b_k$, δίνεται από τη σχέση:

$$B = (X'X)^{-1} X'Y \quad (2.16)$$

όπου X ο πίνακας $n \times k$ με στοιχεία: στην πρώτη στήλη μονάδες και στις υπόλοιπες τις παρατηρηθείσες τιμές κάθε μιας από τις ανεξάρτητες μεταβλητές, Y ο πίνακας στήλη των παρατηρηθείσων τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής (Κολυβά-Μαχαίρα και Μπόρα-Σέντα, 1998).

Αναλογικά με την απλή γραμμική παλινδρόμηση, το μοντέλο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς της εξαρτημένης μεταβλητής με περισσότερες από μία ανεξάρτητες μεταβλητές, δίδεται από μια σχέση της μορφής:

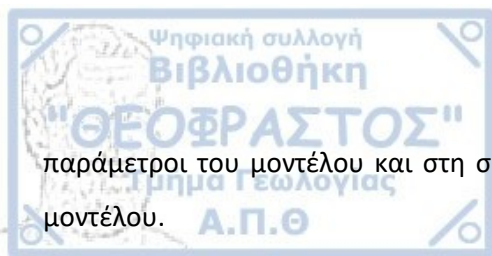
$$Y_i = b_0 + b_1 X_{i1} + b_2 X_{i2} + \dots + b_k X_{ik} \quad (2.17)$$

όπου b_0 σταθερά, η τιμή που παίρνει η εξαρτημένη μεταβλητή όταν $X_i = 0$ και $b_1, \dots, b_k$ σταθερές της κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής με την εξαρτημένη, που θα μπορούσαν ακόμη να είναι και εκφράσεις των συντελεστών συσχέτισης αυτών με την εξαρτημένη μεταβλητή.

Βασικές προϋποθέσεις για την πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση είναι και σε αυτήν την περίπτωση οι μεταβλητές να είναι ποσοτικές και όλες οι ανεξάρτητες μεταβλητές να συνδέονται με σχέση γραμμικής συσχέτισης με την εξαρτημένη. Ταυτόχρονα, οι ανεξάρτητες μεταβλητές θα πρέπει να είναι και μεταξύ τους ασυσχέτιστες.

2.1.4 Μη Γραμμικά Μοντέλα Παλινδρόμησης

Η σχέση που συνδέει δύο μεταβλητές στη μετεωρολογία, αλλά και σε άλλες φυσικές επιστήμες, συχνά δεν είναι γραμμική. Κάτι τέτοιο φαίνεται και από τις ήδη υπάρχουσες σχέσεις που συνδέουν διάφορες μετεωρολογικές παραμέτρους. Στην περίπτωση που η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι μόνο μία, το διάγραμμα διασποράς είναι συχνά ενδεικτικό της μορφής της σχέσης μεταξύ δύο μεταβλητών. Έτσι, η επιλογή της σχέσης γίνεται με βάση το διάγραμμα. Όταν οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι πολλές, όπως στην παρούσα περίπτωση, επιλέγεται τυχαία κάποια μη γραμμική σχέση, εκτιμώνται οι



παράμετροι του μοντέλου και στη συνέχεια γίνεται έλεγχος του πόσο καλή είναι η προσαρμογή του μοντέλου.

Μία σχέση μπορεί να είναι μη γραμμική ως προς τις μεταβλητές ή ως προς τις παραμέτρους. Στην περίπτωση που είναι μη γραμμική ως προς τις μεταβλητές είναι δυνατόν με τη χρήση μετασχηματισμών να μετατραπεί σε γραμμική, για τον ευκολότερο προσδιορισμό των συντελεστών παλινδρόμησης. Τυπικό παράδειγμα αποτελούν οι πολυωνυμικές εξισώσεις. Στην περίπτωση που η σχέση είναι μη γραμμική ως προς τις παραμέτρους δεν είναι πάντα εφικτή η μετατροπή της σε γραμμική. Συναρτήσεις όπως η εκθετική, η λογαριθμική ή οι τριγωνομετρικές είναι μη γραμμικές ως προς τις παραμέτρους και η μετατροπή τους σε γραμμικές είναι δυνατή.

2.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

2.2.1 Έλεγχος της προσαρμογής του μοντέλου

Η καταλληλότητα του μοντέλου και η προσαρμογή του στα δεδομένα είναι αναγκαίο να εξετάζεται αμέσως μετά τη δημιουργία του μοντέλου. Σύμφωνα με τους Fotheringham & Rogerson (1993) για να θεωρηθεί ότι το μοντέλο έχει μια "καλή προσαρμογή" θα πρέπει αυτό να ερμηνεύει τα δεδομένα τα οποία είναι γνωστά με μεγάλη ακρίβεια. Στην πολλαπλή παλινδρόμηση ο βαθμός ακρίβειας εκτιμάται με διάφορους τρόπους, όπως την απόκλιση, την ανάλυση διασποράς, το χ^2 , το κριτήριο Akaike Information Criterion (AIC) και τον συντελεστή προσδιορισμού R^2 .

Γίνεται πολλαπλή ανάλυση διασποράς για να ελεγχθεί αν οι ανεξάρτητες μεταβλητές στο σύνολό τους όντως επηρεάζουν γραμμικά την εξαρτημένη. Γίνεται και απλή ανάλυση διασποράς έτσι ώστε η κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή να ληφθεί υπόψη ή όχι στην ανάλυση παλινδρόμησης.

Εξετάζεται η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού. Όπως προαναφέρθηκε, ο συντελεστής προσδιορισμού ελέγχει την ισχύ της γραμμικής σχέσης μεταξύ της εξαρτημένης και των ανεξάρτητων μεταβλητών. Η εξέταση της τιμής του επιβεβαιώνει την καταλληλότητα του γραμμικού μοντέλου ή προσανατολίζει τον ερευνητή στη χρήση μη γραμμικού μοντέλου. Επειδή στην παρούσα περίπτωση το

μοντέλο είναι πολλαπλό, είναι απαραίτητος και ο έλεγχος των μερικών συντελεστών προσδιορισμού, έτσι ώστε να μη ληφθούν υπόψη, στη δημιουργία του μοντέλου, ανεξάρτητες μεταβλητές που ουσιαστικά δε συνεισφέρουν.

Εξετάζεται, με τον κατάλληλο έλεγχο υπόθεσης η σημαντικότητα του συντελεστή που αντιστοιχεί σε κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή και η στάθμη αυτής. Έτσι ελέγχεται η επίδραση ή όχι κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής στην παράμετρο που θέλουμε να προβλέψουμε.

Ελέγχεται η διασπορά και η τυπική απόκλιση των σφαλμάτων που είναι ενδεικτικές της καλής προσαρμογής του μοντέλου. Τα ίδια στατιστικά υπολογίζονται και για τους διάφορους συντελεστές, έτσι ώστε να ελεγχθεί η αναγκαιότητα συμμετοχής της κάθε μεταβλητής στο μοντέλο. Επίσης ελέγχεται και το τυποποιημένο υπόλοιπο ε/s , το οποίο, όταν ακολουθεί την κανονική κατανομή $N(0,1)$, είναι ενδεικτικό της καλής προσαρμογής του μοντέλου.

Τέλος, η επίδραση κάθε μεταβλητής στην παράμετρο της οποίας επιχειρείται η πρόβλεψη ελέγχεται και με τις ελαστικότητες και τους συντελεστές βήτα, στατιστικές παράμετροι που ορίζονται από τις σχέσεις:

$$\varepsilon_i = b_i \frac{\bar{X}_i}{\bar{Y}}, \quad \beta_i = b_i \frac{s_{Xi}}{s_Y} \quad (2.18)$$

Η πρώτη εκφράζει την ποσοστιαία αντίδραση της εξαρτημένης μεταβλητής που αντιστοιχεί σε ποσοστιαία αντίδραση μιας ανεξάρτητης μεταβλητής, ενώ η δεύτερη την αντίδραση της εξαρτημένης μεταβλητής σε τυπικές αποκλίσεις που προκαλείται από μία ανεξάρτητη μεταβλητή κατά μία τυπική απόκλιση. Μεγάλες τιμές των παραμέτρων αυτών εκφράζουν σχετικά μεγάλη συμμετοχή της αντίστοιχης εξαρτημένης μεταβλητής στον προσδιορισμό της εξαρτημένης.

Όπως έχει αναφερθεί, για τον έλεγχο της προσαρμογής του μοντέλου χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 , ο οποίος εκτιμά κατά πόσο οι ανεξάρτητες μεταβλητές ερμήνευσαν τη διακύμανση της εξαρτημένης. Ουσιαστικά, αποδίδει τη δυνατότητα των μεταβλητών να ερμηνεύσουν το μελετώμενο φαινόμενο.

2.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

Όπως έχει αναφερθεί πιο πάνω, εξετάζοντας τις τιμές διαφόρων στατιστικών είναι δυνατόν να ελεγχθεί η συνεισφορά της κάθε παραμέτρου κι επομένως η αναγκαιότητα να συμπεριληφθεί στο μοντέλο. Ωστόσο, υπάρχουν τρόποι η επιλογή ή απόρριψη των ανεξάρτητων μεταβλητών να γίνεται κατά τη διαδικασία δημιουργίας του μοντέλου, με διάφορες μεθόδους, οι οποίες είναι γνωστές ως μέθοδοι σταδιακής επιλογής μεταβλητών. Για τους σκοπούς της εργασίας χρησιμοποιούνται τρεις από αυτές. Είναι η «προς τα εμπρός επιλογή» (forward selection), η «προς τα πίσω απαλοιφή» (backward elimination) και η «βήμα προς βήμα παλινδρόμηση» (stepwise regression) (Μπόρα_Σέντα και Μωυσιάδης, 1992).

Η «προς τα εμπρός επιλογή» συνίσταται στην προσθήκη κάθε φορά μίας μεταβλητής, εκείνης που εξηγεί το μεγαλύτερο ποσοστό της μη ερμηνευόμενης διασποράς: είναι αυτή που δίνει το μεγαλύτερο μερικό συντελεστή προσδιορισμού. Η διαδικασία σταματάει στον τελευταίο σημαντικά διάφορο του μηδενός συντελεστή προσδιορισμού. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η F κατανομή: περιλαμβάνεται στο μοντέλο μέχρι και η τελευταία μεταβλητή που έχει λόγο F μεγαλύτερο από μια κρίσιμη τιμή.

Η «προς τα πίσω απαλοιφή» λειτουργεί αντίστροφα από την προηγούμενη μέθοδο. Το αρχικό μοντέλο περιλαμβάνει όλες τις μεταβλητές που διατίθενται και θεωρείται ότι επηρεάζουν την μεταβλητή της οποίας επιχειρείται η πρόβλεψη. Κάθε φορά αφαιρείται από το μοντέλο η μεταβλητή με το μικρότερο συντελεστή προσδιορισμού. Η διαδικασία σταματάει όταν μόνο όσες μεταβλητές απαλειφθούν έχουν λόγο F μικρότερο από μια κρίσιμη τιμή.

Τέλος, η μέθοδος «βήμα προς βήμα παλινδρόμηση» είναι ένας συνδυασμός των δύο προηγούμενων. Κάθε φορά προστίθεται στο μοντέλο και μία μεταβλητή, όπως στην «προς τα εμπρός επιλογή» και για την ολοκλήρωση της διαδικασίας χρησιμοποιείται το αντίστοιχο κριτήριο της «προς τα εμπρός επιλογής» αλλά και της «προς τα πίσω απαλοιφής».

Πέραν, όμως, των στατιστικών παραμέτρων, των ελέγχων υποθέσεων και σημαντικότητας και των μεθόδων σταδιακής επιλογής μεταβλητών, οι μετεωρολογικές μεταβλητές που τελικά



υπεισέρχονται στο μοντέλο επιλέγονται και με βάση τη φυσική τους σημασία και σχέση με την εξαρτημένη μεταβλητή.

Επομένως, η διαδικασία της επιλογής των μεταβλητών ενός μοντέλου αποτελεί το σημαντικότερο τμήμα σχηματισμού του. Αυτό συμβαίνει διότι οι μεταβλητές πρέπει να πληρούν ορισμένες προϋποθέσεις, ώστε το μοντέλο να θεωρείται αξιόπιστο. Οι παράμετροι που ελέγχονται ως πιθανές μεταβλητές του μοντέλου πρέπει να είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Κριτήριο για τον καθορισμό των παραμέτρων που θα πρέπει να απορριφθούν εξ αρχής αποτελεί η μεταξύ τους συσχέτιση. Άρα, παράμετροι οι οποίες εμφανίζουν συντελεστή συσχέτισης 1,00, πρέπει να αφαιρεθούν από τη διαδικασία επιλογής.

Επιπλέον, η επιλογή πρέπει να είναι σύμφωνη με το βαθμό στον οποίο επηρεάζει η καθεμιά εκ των παραμέτρων την εξαρτημένη μεταβλητή. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του συντελεστή προσδιορισμού (R^2), ή του συντελεστή συσχέτισης (R). Αν και η διαδικασία αυτή βασίζεται στο μαθηματικό-στατιστικό υπολογισμό, μεγάλη σημασία και βαρύτητα έχει η φυσική συνεισφορά και ερμηνεία της εκάστης ανεξάρτητης μεταβλητής ως προς το φαινόμενο που μελετάται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

3.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία προέρχονται από τις εφαρμογές του Εθνικού Προγράμματος Χαλαζικής προστασίας και αφορούν την περιοχή 1, η οποία το 1997 διευρύνθηκε, καλύπτοντας τμήματα των νομών Ημαθίας, Πέλλας, Κιλκίς, Πιερίας και Θεσσαλονίκης, συνολικής έκτασης 2350 km² και το 2004 επεκτάθηκε εκ νέου στο βόρειο και νότιο τμήμα της. Η σημερινή της έκταση, η οποία και αποτέλεσε την περιοχή μελέτης της διατριβής ειδίκευσης απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Περιοχή 1 του Εθνικού Προγράμματος Χαλαζικής Προστασίας (Πηγή: <http://elga.gr/energitiki-prostasia/keme/113-istoria>).

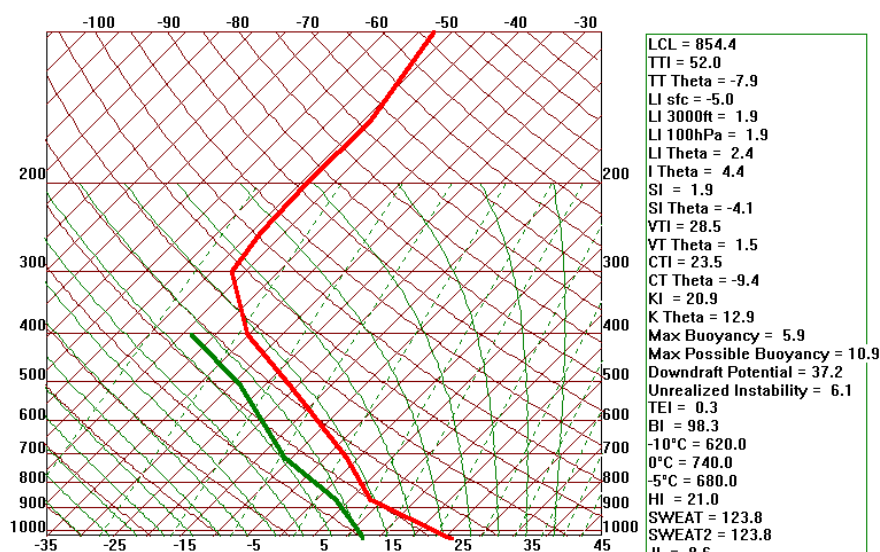
Πρόκειται για μια πεδινή έκταση που καλύπτεται από σημαντικές, τόσο για την τοπική όσο και για την εθνική οικονομία, δυναμικές καλλιέργειες. Είναι μια από τις περιοχές που πλήττονται από το χαλάζι με άμεσες αρνητικές επιπτώσεις στην παραγωγή. Επομένως, μια έγκαιρη πρόβλεψη χαλαζοκαταιγίδων θα έδινε τη δυνατότητα έγκαιρης επέμβασης, με σκοπό την σημαντική μείωση των ζημιών. Αυτός είναι ένας σημαντικός λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε αυτή η περιοχή μελέτης (Karacostas, 1984). Επίσης, βρίσκεται σε ικανοποιητική απόσταση από το συνοπτικό σταθμό της Θεσσαλονίκης, κι έτσι οι ραδιοβολίες του τελευταίου μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές της θερμοϋγρομετρικής κατάστασης της ατμόσφαιρας γι' αυτή.

Η περίοδος μελέτης αφορά και αυτή τους μήνες εφαρμογής του προγράμματος λόγω της αυξημένης εμφάνισης του φαινομένου και περιλαμβάνει τις ημέρες από 1 Απριλίου έως και 30 Σεπτεμβρίου. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφουν τις καιρικές συνθήκες των 6 αυτών μηνών των ετών 2008, 2009 και 2010 για τις ημέρες που εμφανίστηκαν χαλαζοκαταιγίδες. Ως ημέρες χαλαζόπτωσης θεωρούνται εκείνες κατά τις οποίες σε ένα τουλάχιστον χαλαζόμετρο, του υπάρχοντος στην περιοχή δικτύου, υπήρξαν ενδείξεις χαλαζόπτωσης. Έτσι, ο συνολικός αριθμός ημερών χαλαζόπτωσης ανέρχεται συνολικά στις 256 (Ετήσια έκθεση, Ε.Π.Χ.Π., 2008).

Είναι φανερό ότι ενδεχομένως να σημειώθηκε χαλάζι στην ευρύτερη περιοχή και κάποιες άλλες ημέρες, αλλά να έπεσε έξω από τα όρια της περιοχής μελέτης - κι επομένως δεν 'καταγράφηκε' στα χαλαζόμετρα. Επίσης, η σπορά των νεφών, για καταστολή του χαλαζιού, είναι δυνατόν ή να αποσόβησε το χαλάζι ή να το μετέτρεψε σε βροχή. Τέλος, το δίκτυο των χαλαζομέτρων, παρά την ικανοποιητική πυκνότητα αυτών, είναι πιθανό να μην κατέγραψε επακριβώς τις περιπτώσεις χαλαζόπτωσης (Karacostas, 1989). Έτσι, οι θεωρούμενες ημερομηνίες αποτελούν ένα γνήσιο υποσύνολο των πραγματικών ημερομηνιών χαλαζόπτωσης. Όμως, επειδή σημειώθηκε αναμφίβολα χαλάζι τις ημέρες αυτές και επειδή γι' αυτές υπάρχουν επαρκή δεδομένα, το δείγμα θεωρείται σημαντικό και αντιπροσωπευτικό και ως τέτοιο, κρίνεται ικανοποιητικό για την παρούσα μελέτη.

3.2.1 Ραδιοβολίσεις

Ο συνοπτικός σταθμός του αεροδρομίου Θεσσαλονίκης θεωρείται αντιπροσωπευτικός και για την περιοχή μελέτης. Από τις ραδιοβολίσεις του σταθμού αυτού λαμβάνονται τα μετεωρολογικά δεδομένα. Αφορούν στην ώρα 12 UTC (15 τοπική ώρα) και παρέχουν δεδομένα για την επιφάνεια και για τις βασικές ισοβαρικές στάθμες από τα 1000 ως τα 100 hPa. Οι μετεωρολογικές παράμετροι που μετρώνται είναι η ατμοσφαιρική πίεση, η θερμοκρασία αέρα, το σημείο δρόσου και η διεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου. Από αυτές είναι δυνατόν να υπολογιστούν η μερική πίεση και η αναλογία μίγματος των υδρατμών, σε κατάσταση κορεσμού ή όχι, η σχετική υγρασία, η δυναμική θερμοκρασία, η ισοδύναμη δυναμική θερμοκρασία, το υετίσιμο ύδωρ σε διάφορα στρώματα, διάφοροι δείκτες αστάθειας που συνδυάζουν χαρακτηριστικά διαφορετικών ισοβαρικών επιπέδων, τα διάφορα επίπεδα συμπύκνωσης και άλλες μετεωρολογικές μεταβλητές. Ο υπολογισμός των παραπάνω παραμέτρων έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος RAOB, αλλά και πολλές παράμετροι προήλθαν από την ιστοσελίδα του Πανεπιστημίου του Wyoming. Ενδεικτικά παρατίθενται στο Σχήμα 3.2 το logP-skewT θερμοδυναμικό διάγραμμα και μια σειρά δεικτών αστάθειας, έτσι όπως υπολογίζονται από το πρόγραμμα RAOB.



Σχήμα 3.2: Ενδεικτική απεικόνιση του SkewT-LogP διαγράμματος και μετεωρολογικών παραμέτρων, όπως αυτές υπολογίζονται από το RAOB.

3.2.2 Ραντάρ και λογισμικό TITAN

Ανεξάρτητες μεταβλητές αλλά και η εξαρτημένη μεταβλητή προήλθαν από τα δεδομένα του ραντάρ καιρού WSR-74S. Το ραντάρ παρέχει δεδομένα ολόκληρου του 24-ώρου, τα οποία αποτυπώνονται μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχονται όλα τα νεφικά συστήματα που βρίσκονται εντός αλλά και πλησίον της περιοχής ενδιαφέροντος.

Πρόκειται για ένα μετεωρολογικό ραντάρ C-band των 5cm της εταιρείας 3Δ, το οποίο είναι τοποθετημένο στο Φίλυρο της Θεσσαλονίκης. Με τη βοήθεια αυτού και του λογισμικού TITAN (Dixon and Wiener, 1993) καταγράφεται κατά το μέγιστο δυνατό η εκάστοτε καταιγίδα. Υπάρχει καταγεγραμμένη η ακριβής ημερομηνία και ώρα εμφάνισης της, καθώς και οι συντεταγμένες αυτής. Ταυτόχρονα, παρέχονται πληροφορίες και για τον όγκο, τη μάζα, την έκταση της, σε οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο, τη μέση και μέγιστη ανακλαστικότητα που μετρήθηκε κατά το χρόνο ζωής της, τη διεύθυνση και την ταχύτητα κίνησής της, τον υετό που περιείχε και κάποιους ρυθμούς αύξησης ή ελάττωσης ορισμένων από τα παραπάνω χαρακτηριστικών.

Ο **Ραδιοεντοπιστής** είναι διεθνώς γνωστός με το όνομα **Ραντάρ (RADAR)**, το οποίο προέρχεται από τις λέξεις της αγγλικής γλώσσας "**Radio Detection And Ranging**" και οι οποίες σημαίνουν "ανίχνευση με ηλεκτρομαγνητικά κύματα και μέτρηση αποστάσεως". Είναι ένα σύστημα το οποίο με τη χρήση του ηλεκτρομαγνητισμού εντοπίζει και παρακολουθεί είτε ακίνητους είτε κινητούς στόχους, οι οποίοι δε θα μπορούσαν να γίνουν διακριτοί με άλλα μέσα λόγω της έλλειψης φωτεινότητας ή της απομακρυσμένης τους θέσης. Ουσιαστικά, εκπέμπει ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, το οποίο ανακλάται στο στόχο, επιστρέφει πίσω και ανάλογα με τα χαρακτηριστικά αυτού αποδίδει και τις ιδιότητες του στόχου. Η αξιοπιστία και η ακρίβεια που αποδίδονται, οι ιδιότητες των στόχων, ακόμα και όταν αυτοί βρίσκονται σε μακρινές αποστάσεις, καθιστά το ραντάρ ένα σημαντικό και απαραίτητο εργαλείο.

Αναπόσπαστο μέρος του ραντάρ είναι η κεραία του, η οποία φαινομενικά είναι ένα μεγάλο πιάτο, που περιστρέφεται 360° στον οριζόντιο άξονα και 20° στον κατακόρυφο Σχήμα 3.3). Αυτή βρίσκεται προστατευμένη σε έναν μεγάλο εξαγωνικό θόλο και καθώς περιστρέφεται εκπέμπει σήματα με ταχύτητα που προσεγγίζει την ταχύτητα του φωτός. Τα επαναλαμβανόμενα σήματα-παλμοί διαρκούν 0.00000157s και εκπέμπονται κάθε 0.00099843s. Όταν τα κύματα φτάσουν τον στόχο, σκεδάζονται και ένα μέρος αυτών επιστρέφει ξανά στο ραντάρ. Με την επανάληψη αυτής της διαδικασίας 1300 φορές το δευτερόλεπτο, με τη μέτρηση του χρόνου εκπομπής, σκέδασης και επιστροφής των κυμάτων και

σύμφωνα με το φαινόμενο Doppler, επιτυγχάνεται ο υπολογισμός της απόστασης, κατεύθυνσης και πολλών άλλων χαρακτηριστικών του στόχου.



Σχήμα 3.3: Η κεραία του ραντάρ καιρού (Πηγή: <https://www.3dsa.gr/el/drasthriothtes/sunthrhsh-radar>)

Για μετεωρολογικούς σκοπούς, στόχο μπορεί να αποτελέσει μια σταγόνα βροχής, ένα παγοκρυστάλλιο, ή ένας χαλαζόκοκκος. Έτσι, τα δεδομένα που παρέχονται από το ραντάρ δίνουν σημαντική πληροφορία για τις καταιγίδες, γενικά.

Η βασική εξίσωση του ραντάρ συνδέει την ισχύ που επέστρεψε στο ραντάρ με την ενεργό διατομή του στόχου. Αποδεικνύεται (Battan, 1973) ότι για σφαιρικά σωματίδια, μικρά σε σχέση με το μήκος κύματος της δέσμης του ραντάρ, η μέση επαναλαμβανόμενη ισχύς δίνεται από τη σχέση 3.1.

Σημαντικό εργαλείο για τον εντοπισμό του φαινομένου και την εκτέλεση της έρευνας αποτελεί και το καταγραφικό σύστημα TITAN (Thunderstorm Identification, Trucking, Analysis and Nowcasting), στο οποίο καταγράφονται οι διάφορες μετρήσεις του ραντάρ. Οι Dixon and Wiener (1993) δημιούργησαν το λογισμικό TITAN με το οποίο καταγράφονται και αποθηκεύονται όλα τα χαρακτηριστικά και απαραίτητα δεδομένα σχετικά με τις καταιγίδες (Σχήμα, 3.4). Μέσω αυτού του λογισμικού αποτυπώνεται ο τρόπος με τον οποίο δημιουργούνται και αναπτύσσονται τα κύτταρα, η ταχύτητα που κινούνται, η διαδρομή που ακολουθούν και σταδιακά η αποδυνάμωσή τους.

$$P_r = \frac{\pi^3 c}{1024 \ln 2} \frac{P_t G^2 \Theta^2 \tau}{\lambda^2} \frac{\|K\|^2}{r^2} Z \quad (3.1)$$

P_r : Ισχύς σε Watt του ηλεκτρομαγνητικού σήματος που επιστρέφει από ένα στόχο και λαμβάνεται από την κεραία

P_t : Η μέγιστη ισχύς σε Watt

G : Απολαβή ισχύος από την κεραία

τ : Διάρκεια παλμού

r : Η απόσταση του στόχου από το ραντάρ σε m

λ : Το μήκος κύματος του ραντάρ σε m

Θ : Η γωνία της δέσμης

$\ln 2$: Διορθωτικός συντελεστής λόγω ατμόσφαιρας

$\|K\|^2$: Διηλεκτρική παράμετρος (σχετίζεται με το υλικό του στόχου, τη θερμοκρασία και το μήκος κύματος)

c : $3 \cdot 10^8$ m/s

Z : Συντελεστής ανακλαστικότητας

Μέσω του TITAN παρέχεται η δυνατότητα απεικόνισης, τόσο των οριζόντιων επιπέδων, όσο και των κάθετων τομών, που επιλέγει ο χειριστής να εξετάσει. Η αποτύπωση των οριζόντιων επιπέδων ξεκινά από αυτό των 2km και φτάνει τα 18km, με δυνατότητα αποτύπωσης όλων των ενδιάμεσων επιπέδων ανά 1km.

Η χρήση των μετεωρολογικών ραντάρ είναι πλέον επιβεβλημένη κατά τις επιχειρήσεις πρόβλεψης των χαλαζοκαταιγίδων. Οι τιμές των ανακλαστικότητας συντελούν στην ανίχνευση των αναπτυσσόμενων κυττάρων της καταιγίδας, στην εκτίμηση του μεγέθους των χαλαζοκόκκων και κατ' επέκταση στον εντοπισμό της θέσης και της ισχύος της χαλαζόπτωσης.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται τα δεδομένα του ραντάρ που αφορούν στις περιοχές μέγιστης ανακλαστικότητας, που αντιστοιχούν σε αναπτυσσόμενα κύτταρα, σε διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της ημέρας, τη θέση τους ως προς το ραντάρ και το ύψος μέχρι το οποίο εκτείνονται. Ειδικότερα, για κάθε ημέρα χαλαζόπτωσης, εντοπίζεται και χρησιμοποιείται η μέγιστη τιμή



Οι συνοπτικοί χάρτες καιρού είναι βασικό εργαλείο για τη μελέτη και αποσαφήνιση των καιρικών συνθηκών που επικρατούν και αυτό συμβαίνει διότι μέσω της μελέτης των χαρτών επιφανείας και όλων των ισοβαρικών επιπέδων, παρουσιάζεται η κατακόρυφη δομή των μετεωρολογικών συστημάτων.

- 38 -

επιφανειών των 850, 700, 500, 300 και 200 hPa, καθώς και ο χάρτης των ισοπαχών για το στρώμα των 1000-500 hPa, στις 12 UTC. Οι χάρτες αυτοί περιγράφουν την ατμοσφαιρική κυκλοφορία στις αντίστοιχες ισοβαρικές επιφάνειες και τις συνθήκες, οι οποίες ενδεχομένως να ευνοούν τη δημιουργία χαλαζοκαταιγίδας και την εκδήλωσή της στην επιφάνεια.

Μια χαλαζοκαταιγίδα μπορεί να εκδηλωθεί οποιαδήποτε ώρα της ημέρας, κατά κανόνα όμως, τις απογευματινές (Karacostas, 1991). Ωστόσο, χάρτες υπάρχουν μόνο για τις 00 και 12 UTC (United Kingdom Met Office) και όχι για τις ενδιάμεσες ώρες. Παρ' όλα αυτά, η μελέτη της κυκλοφορίας στην ευρύτερη περιοχή, σε συνδυασμό με την υπόθεση της συνέχειας από την οποία διέπεται και τις κλίμακες χρόνου που τη χαρακτηρίζουν, δίνουν ενδείξεις για την εξέλιξη του πεδίου της πίεσης στην επιφάνεια της περιοχής ενδιαφέροντος, σε όλη τη διάρκεια της ημέρας.

3.2.4 Ποιοτικός έλεγχος και επεξεργασία

Η διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων ραδιοβολίσεων είναι δύσκολη και επίπονη με πολλούς βαθμούς αβεβαιότητας, κυρίως λόγω της μέτρησης και καταγραφής των αρχικών δεδομένων. Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητος ένας αρχικός ποιοτικός έλεγχος των δεδομένων, αλλά και ένας συνεχής έλεγχος σε όλα τα μετέπειτα στάδια και παράγωγα αποτελέσματα.

Έτσι λοιπόν, ελλιπή δεδομένα ραδιοβολίσεων, όπως και λαθεμένες μετρήσεις και καταγραφές δεν συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση και επεξεργασία των στοιχείων. Επιπρόσθετα, τιμές που δεν συνάδουν με τη φυσική σημασία και ερμηνεία των παραμέτρων και επιμέρους φαινομένων προς έρευνα, θεωρήθηκαν παράτυπες (outliers) και δεν χρησιμοποιήθηκαν στους περεταίρω υπολογισμούς. Το σύνολο και ποσοστό των παράτυπων στοιχείων, πάντοτε αναφέρεται στα στάδια της επεξεργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

4.1 Η ΕΞΑΡΤΗΜΕΝΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΚΑΙ Η ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ

Για την επίτευξη του αντικειμενικού στόχου της παρούσας μελέτης, απαιτείται η επιλογή μιας παραμέτρου η οποία θα συνδέεται άμεσα με την ανάπτυξη και εκδήλωση μιας χαλαζοκαταιγίδας, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί ως εξαρτημένη μεταβλητή στο μοντέλο πρόβλεψης που πρόκειται να γίνει. Η μεταβλητή αυτή θα πρέπει να αποτελεί όσο το δυνατόν αντικειμενική ένδειξη, της πτώσης χαλαζιού στο έδαφος της περιοχής ενδιαφέροντος. Η καταγραφείσα από το ραντάρ τιμή της μέγιστης ανακλαστικότητας της ημέρας, πάνω από την περιοχή μελέτης, κρίνεται ότι ικανοποιεί τις παραπάνω απαιτήσεις.

Στην περίπτωση των μετεωρολογικών ραντάρ, και ιδιαίτερα αυτών για την ανίχνευση καταιγίδων, η χρησιμοποιούμενη ενέργεια αφορά, συνήθως συχνότητες που ανήκουν στις περιοχές C-band και S-band, με μήκη κύματος στα 5 cm και 10 cm αντίστοιχα (2-4 GHz και 4-8 GHz). Τα παραπάνω μήκη κύματος προτιμώνται στις μετεωρολογικές εφαρμογές, γιατί υφίστανται μικρότερη απορρόφηση και σκέδαση από τα συστατικά της ατμόσφαιρας, σε σχέση με μικρότερα μήκη κύματος (Rogers and Yau, 1989). Ένα μέτρο της ισχύος του σήματος που επιστρέφεται από ένα σύνολο σταγόνων ή παγοκρυσταλλίων είναι ο παράγων «ανακλαστικότητα» που συμβολίζεται με z . Η ανακλαστικότητα για μια ομάδα υδρομετεώρων εξαρτάται από την κατανομή μεγέθους, τη συγκέντρωση, τη φυσική τους κατάσταση (πάγος ή νερό), το σχήμα καθενός και τη μορφή τους σε σχέση με το ραντάρ (Husckey,

1959). Θεωρώντας ένα σύνολο βροχοσταγόνων, ο παράγων της ανακλαστικότητας μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$Z_e = \frac{\sum_{i=1}^k N_i D_i^6}{\nu} \quad (4.1)$$

όπου N_i είναι το πλήθος των κατακρημνισμάτων διαμέτρου D_i ως $D_i + \delta D$ και δD είναι το διάστημα διαμέτρων αυτών που συντελούν στη μέτρηση της ανακλαστικότητας και ν είναι ο όγκος τους. Αν και η μονάδα μέτρησης είναι mm^6/m^3 , η ανακλαστικότητα εκφράζεται με τη βοήθεια των μονάδων dBZ.

Ο συμβολισμός απαρτίζεται από το dB που προέρχεται από τη λέξη "decibel" και το σύμβολο Z της ανακλαστικότητας και η λογαριθμική του έκφραση είναι:

$$\text{dBZ} = 10 \log_{10} \frac{Z_e}{1 \text{mm}^6 \text{m}^{-3}} \quad (4.2)$$

Η ισχύς που λαμβάνεται, τελικά, από το ραντάρ, με την επιστροφή του σήματος που εξέπεμψε, δίνεται ως συνάρτηση του παράγοντα ανακλαστικότητας από τη σχέση (Rogers and Yau, 1989):

$$10 \log \bar{P}_r = 10 \log z - 20 \log r + C \quad (4.3)$$

όπου r η ακτίνα εκπομπής του ραντάρ και C σταθερά που εξαρτάται από τα στοιχεία του ραντάρ και το διηλεκτρικό χαρακτήρα του στόχου.

Συνηθίζεται, για ευκολία, ο παράγοντας της ανακλαστικότητας να χρησιμοποιείται κυρίως στη λογαριθμική του μορφή, που δίνεται από τη σχέση:

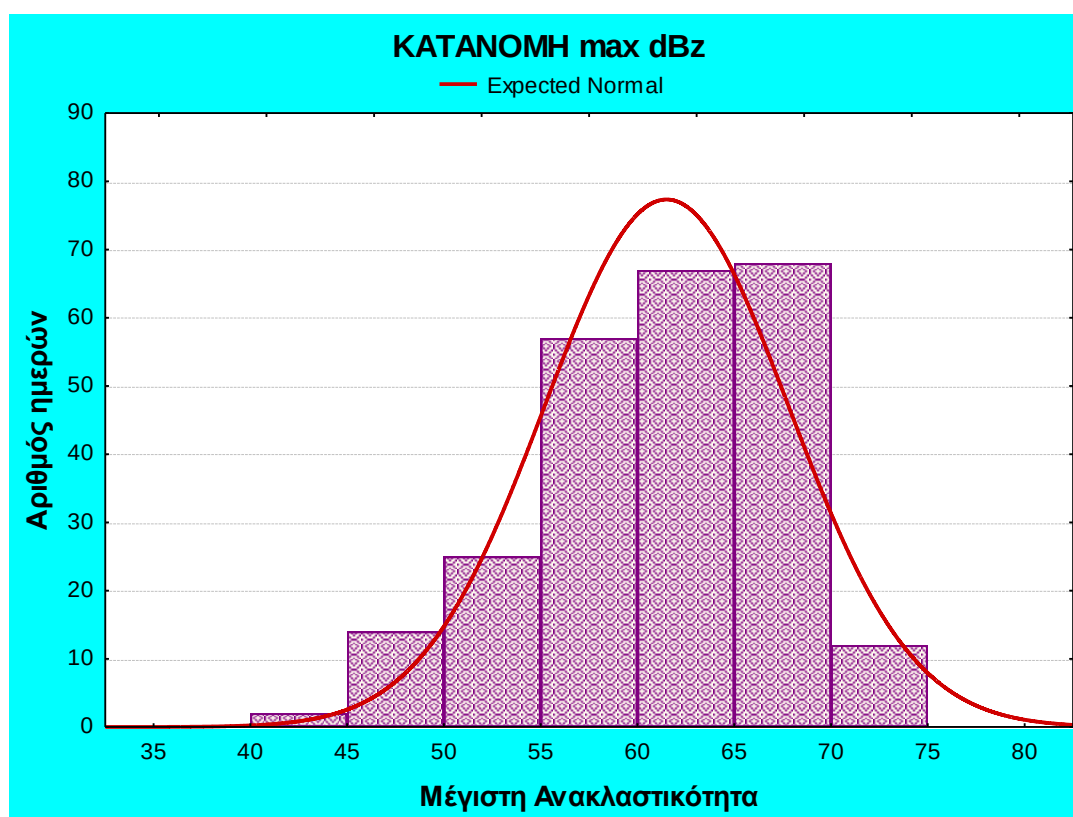
$$Z = 10 \log \left(\frac{z}{1 \text{mm}^6 / \text{m}^3} \right) \quad (4.4)$$

Οι μονάδες της ανακλαστικότητας, στη λογαριθμική της έκφραση, είναι τα dBz, δηλαδή τα «decibels που αντιστοιχούν σε ανακλαστικότητα ίση με $1 \text{mm}^6/\text{m}^3$ » (Rinehart, 1991). Η τιμή της ανακλαστικότητας, για ισχυρό χαλάζι, μπορεί να φτάσει και τα 75dBz. Συνήθως, όμως, ανακλαστικότητες πάνω από 45 dBz συνδέονται με χαλάζι (Browning, 1977). Γενικά, όσο πιο μεγάλη η τιμή της ανακλαστικότητας, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα παρουσίας χαλαζόκοκκων και τόσο πιο μεγάλοι χαλαζόκοκκοι είναι πιθανό να υπάρχουν.

Οι μέγιστες ανακλαστικότητες έχουν χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία δεικτών, όπως ο FK (Φλόκα και Καρακώστας, 1988), ο TK-4 (Karacostas, 1990), ο THE (Χατζή, 1992) και πολλοί άλλοι.

Με βάση τα παραπάνω, αποτυπώθηκαν τα δεδομένα της ανακλαστικότητας στην παρούσα μελέτη. Από το σύνολο των ανακλαστικοτήτων που σημειώθηκαν τις ημέρες με χαλαζοκαταιγίδα και για κάθε μια από αυτές επιλέχθηκε η μεγαλύτερη τιμή και χρησιμοποιήθηκε αναφερόμενη ως μέγιστη ανακλαστικότητα. Αυτή επιλέχθηκε να είναι και η εξαρτημένη μεταβλητή του μοντέλου λόγω της άμεσης σύνδεσής της με το φαινόμενο της χαλαζόπτωσης.

Για καλύτερη κατανόηση της στατιστικής και φυσικής συμπεριφοράς της εξαρτημένης μεταβλητής, απεικονίζεται η κατανομή της συχνότητας εμφάνισης της μέγιστης ανακλαστικότητας στην περιοχή ενδιαφέροντος για το χρονικό διάστημα μελέτης.



Σχήμα 4.1: Συχνότητα εμφάνισης της μέγιστης ανακλαστικότητας στην περιοχή ενδιαφέροντος για το χρονικό διάστημα μελέτης.

Όπως είναι ευδιάκριτο η πλειονότητα των ανακλαστικοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν ξεπερνούσε τα 45 dBz ως μέγιστη εμφανιζόμενη ανακλαστικότητα. Αυτό συμβαδίζει με την υπόθεση ότι οι ημέρες συνοδεύτηκαν από το φαινόμενο της χαλαζόπτωσης.

Επίσης, από την κατανομή προκύπτει ότι ο μέσος όρος των τιμών της είναι 61,5, η διάμεσος 62,5,

η ελάχιστη και μέγιστη τιμή 40,5 και 74 αντίστοιχα, ενώ το 50% των παρατηρήσεων βρίσκεται μεταξύ 57,5 και 66 και το 85% μεταξύ 52,5 και 70.

Οι τιμές των συντελεστών λόξωσης και κύρτωσης είναι -0,58 και -0,13 αντίστοιχα, γεγονός που δηλώνει ότι η λόξωση είναι λιγάκι αρνητική και η κατανομή λόγω αρνητικής κύρτωσης χαρακτηρίζεται σχετικώς πλατύκυρτη. Αναλυτικότερα, η αρνητική κύρτωση αποκαλύπτει ότι οι μικρές τιμές είναι λιγότερες από τις μεγαλύτερες και η διάμεσος είναι μεγαλύτερη από τη μέση τιμή. Η πλατύκυρτη κατανομή υποδηλώνει ότι είναι σχετικά "επίπεδη", δηλαδή οι τιμές της κατανέμονται πιο ομαλά.

4.2 ΟΙ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ

Η χαλαζοκαταιγίδα είναι ένα έντονο καιρικό φαινόμενο μικρής διάρκειας. Η εκδήλωσή της είναι αποτέλεσμα μιας σειράς διεργασιών σε διάφορες κλίμακες χώρου και χρόνου, στις οποίες συνεισφέρουν ποικίλες μετεωρολογικές παράμετροι. Οι παράγοντες που συμβάλλουν στη δημιουργία χαλαζιού, σύμφωνα με τους Browning (1977), Doswell (1987), αλλά και με την σύγχρονη επικρατούσα άποψη, είναι:

- η αστάθεια στην ατμόσφαιρα
- η διαθέσιμη υγρασία στα κατώτερα στρώματα
- η ύπαρξη ενός μηχανισμού που θα δημιουργήσει αστάθεια ή θα ενισχύσει την ήδη υπάρχουσα. Επιπλέον, ευνοϊκά λειτουργεί και
- η ύπαρξη ισχυρού διατμητικού ανέμου που, συνήθως, στρέφεται με το ύψος

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι στο σχηματισμό χαλαζιού συμμετέχουν συνοπτικής, μέσο-α και μέσο-β κλίμακας διεργασίες. Ο όρος "συνοπτική κλίμακα" περιγράφει τη "μεγάλη κλίμακα" με φαινόμενα έκτασης 1000 έως 5000km και η μέση κλίμακα αφορά σε φαινόμενα έκτασης 100 έως 1000km (Πυθαρούλης, 2016). Ωστόσο, το τελικό του μέγεθος εξαρτάται άμεσα και από μικρότερης κλίμακας διαδικασίες. Επηρεάζεται, μεταξύ άλλων, από το είδος, τη συγκέντρωση και το μέγεθος των πυρήνων συμπύκνωσης, καθώς και από την κατανομή των εμβρύων χαλαζιού μέσα στο νέφος. Επίσης, σημαντικό ρόλο παίζουν τα ύψη στα οποία

εκτείνεται το νέφος, η κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας μέσα σ' αυτό, το πάχος διαφόρων στρωμάτων με συγκεκριμένο - καθοριστικό για την ανάπτυξη ενός χαλαζόκοκκου - θερμοκρασιακό χαρακτήρα και η διαθέσιμη σ' αυτά υγρασία. Τέλος, ο συνδυασμός της κατανομής των παραπάνω παραμέτρων με την ισχύ και θέση του ανοδικού ρεύματος μέσα στο νεφικό σχηματισμό, συντελούν στην τελική μορφή της χαλαζοκαταιγίδας.

4.2.1 Αστάθεια

Ένα στερεό σώμα, όσον αφορά την ισορροπία στην οποία βρίσκεται, μπορεί να χαρακτηριστεί ως ευσταθές, ασταθές ή ουδέτερο, ανάλογα με τη ροπή επαναφοράς που θα εμφανιστεί ή όχι κατά την κίνησή του.

Στη Μετεωρολογία μια σημαντική παράμετρος που εξετάζεται είναι η ισορροπία στην οποία βρίσκεται ο ατμοσφαιρικός αέρας. "Ευσταθή" ισορροπία έχει ο αέρας στην περίπτωση που προκαλείται ροπή επαναφοράς κατά τη μετακίνησή του κατά τον κατακόρυφο άξονα, ή γενικά όταν οι κινήσεις είναι επιβραδυνόμενες. Πιο απλά, σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται ο όρος "ευσταθής" ατμόσφαιρα. Αντίθετα, όταν οι κινήσεις είναι επιταχυνόμενες, η ατμόσφαιρα, ή η ισορροπία του αέρα, θεωρείται "ασταθής" (Μακρογιάννης και Σαχσαμάνογλου, 1994).

Κατά τη γενική έννοια, ευστάθεια ονομάζεται η κατάσταση της ατμόσφαιρας στην οποία, είτε δεν παρατηρούνται κατακόρυφες κινήσεις, είτε όταν αυτές παρατηρούνται είναι σχετικά περιορισμένες.

Αντίστοιχα, αστάθεια ονομάζεται η κατάσταση της ατμόσφαιρας η οποία χαρακτηρίζεται από έντονες ανοδικές κινήσεις. Αυτή συνδέεται με τη συμπύκνωση υδρατμών και δημιουργία φαινομένων όπως βροχή, χιόνι, χαλάζι κλπ.

Η αστάθεια στην ατμόσφαιρα διακρίνεται σε δύο κατηγορίες, τη δυναμική και τη στατική. Η δυναμική αστάθεια χρησιμοποιείται όταν τα ατμοσφαιρικά στρώματα παρουσιάζουν αστάθεια κατά τον οριζόντιο άξονα, δηλαδή όταν ένα στρώμα είναι ασταθές αφού έχει κορεστεί. Όταν οι κινήσεις του ατμοσφαιρικού αέρα είναι κατακόρυφες χρησιμοποιείται ο όρος της στατικής αστάθειας.

Ο βαθμός στον οποίο η ατμόσφαιρα βρίσκεται σε ισορροπία αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη διεξαγωγή της πρόγνωσης του καιρού, αλλά και τις καθημερινές μετεωρολογικές ανάγκες. Έτσι, είναι επιθυμητό αυτός ο βαθμός της ισορροπίας να αποδίδεται με έναν αριθμό-δείκτη. Κατά τη διάρκεια των

ετών έχουν δημιουργηθεί και θεσπιστεί διεθνώς αρκετοί εμπειρικοί αριθμοί-δείκτες και είναι γνωστοί ως δείκτες αστάθειας ή ευστάθειας. Παρακάτω θα παρουσιαστούν ορισμένοι από αυτούς και οι κρίσιμες τιμές αυτών για την Ελλάδα, καθώς αυτές διαφέρουν ανάλογα με την περιοχή.

4.2.1.1 Δείκτης Showalter (SI)

Δημιουργήθηκε από τον Showalter το 1953 και φέρει το όνομά του (Showalter, 1953). Ορίζεται ως η αλγεβρική διαφορά της θερμοκρασίας που αποκτά μια αέρια μάζα, όταν αυτή μεταφερθεί από τα 850 hPa, αρχικά, ξηρά αδιαβατικά μέχρι κορεσμού και κατόπιν υγρά αδιαβατικά μέχρι τα 500 hPa, από τη θερμοκρασία που παρατηρήθηκε στα 500 hPa. Αποτελεί μέτρο της δυναμικής ευστάθειας-αστάθειας της ατμόσφαιρας και εκφράζεται από τη σχέση:

$$SI = T_{500} - T_{500(lift-850)} \quad (4.5)$$

Η θερμοκρασία στα 500 hPa λαμβάνεται απευθείας από τη ραδιοβόλση, ενώ η $T_{500(lift-850)}$ υπολογίζεται. Η $T_{500(lift-850)}$ μπορεί να υπολογιστεί γραφικά με τη χρήση του τεφιγράμματος και τα δεδομένα των παρατηρήσεων θερμοκρασίας στα 850 hPa, όπως χαρακτηριστικά απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2. Επίσης μπορεί να υπολογιστεί εφαρμόζοντας, διαδοχικά, την εξίσωση της ξηρής αδιαβατικής (4.6) και την εξίσωση της υγρής αδιαβατικής μεταβολής (4.7):

$$T_s = T_{850} (P_s / P_{850})^{0.286} \quad (4.6)$$

$$T_{500(lift-850)} = T_s - 99c(z_{500} - z_s) \left\{ [1 + br / (aT_s)] / [1 + 0,622b^2r_s / (1,00464 \cdot 10^7 aT_s^2)] \right\} \quad (4.7)$$

Ο δείκτης s αναφέρεται στο επίπεδο κορεσμού που επιτυγχάνεται με ξηρή αδιαβατική μεταβολή και a , b , c σταθερές ($a=2870500$, $b=2.4001e10$, $c=9.71e-5$).

Γενικά, αρνητικές τιμές του δείκτη δηλώνουν αστάθεια (ο ανερχόμενος αέρας είναι θερμότερος του περιβάλλοντος), ενώ θετικές τιμές δηλώνουν μεγάλη πιθανότητα υετού και μικρή πιθανότητα καταιγίδων.

Ο Showalter Index εφαρμόστηκε στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου (Ελλάδα, Κύπρος) (Κατσιμάρδος, 1979; Michalopoulou and Jacobides, 1987) και βρέθηκε να δίνει καλύτερα αποτελέσματα, όταν συνδυαστεί με τον δείκτη υγρασίας Humidity Index (HI). Αυτό συμβαίνει, γιατί ο SI συμπεριλαμβάνει, εκτός από τη δυναμική αστάθεια, την υγρασία στο επίπεδο των 850 hPa, δηλαδή μόνο στο κατώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας, ενώ ο HI είναι ενδεικτικός της υγρασίας στα 850 hPa, στα

700 hPa και στα 500 hPa, δηλαδή σχεδόν σ' όλο το πάχος της ατμόσφαιρας που έχει να κάνει με ένα καταιγιδοφόρο νέφος.

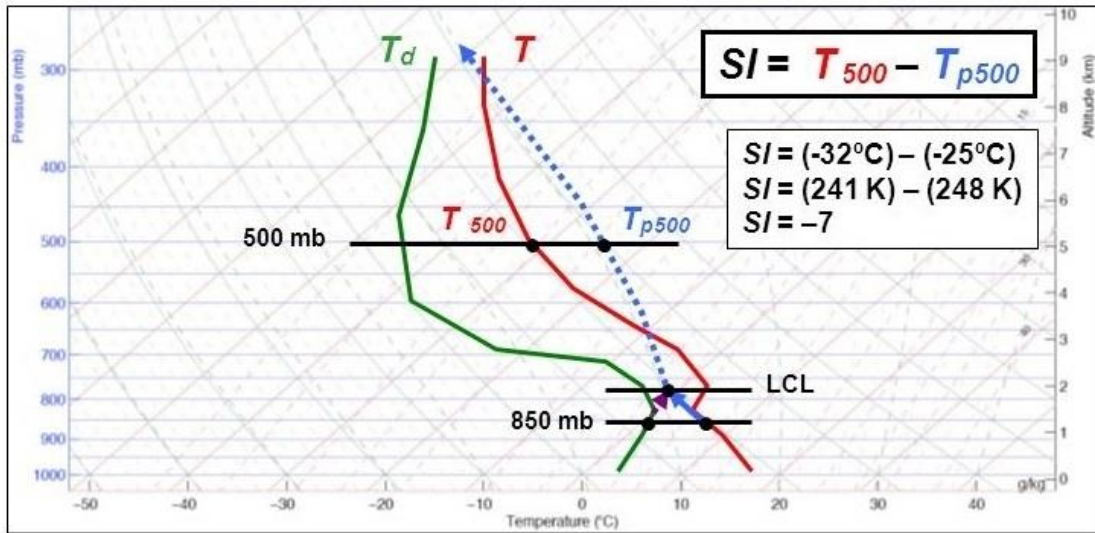
SHOWALTER INDEX

$$SI = T_{500} - T_{500(\text{lift-850})}$$

SI ή SHOW: δείκτης showalter

T_{500} : θερμοκρασία στο επίπεδο των 500hPa

$T_{p500} - T_{500(\text{lift-850})}$: θερμοκρασία αδιαβατικά ανυψούμενου δείγματος αέρα από το επίπεδο των 850hPa στο επίπεδο των 500hPa



Σχήμα 4.2: Γραφική απεικόνιση του δείκτη Showalter Index.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κρίσιμες (οριακές) τιμές του SI για τον ελληνικό χώρο, όπως αυτές προέκυψαν από προηγούμενες αναφορές:

- 1) Όταν $SI > 3$, επικρατεί ευστάθεια
- 2) Όταν $0 \leq SI \leq 3$, επικρατεί αστάθεια με πιθανή εκδήλωση βροχοπτώσεων
- 3) Όταν $-3 \leq SI \leq 0$, επικρατεί αστάθεια με πιθανή εκδήλωση καταιγίδων
- 4) Όταν $-6 \leq SI \leq 3$, επικρατεί αστάθεια με πιθανή εκδήλωση ισχυρών καταιγίδων
- 5) Όταν $SI \leq -6$, επικρατεί εντονότατη αστάθεια με πολύ πιθανή την εκδήλωση βίαιων ατμοσφαιρικών φαινομένων όπως για παράδειγμα σίφωνες ξηράς ή θάλασσας.

4.2.1.2 Δείκτης Lifted (LI)

Ο δείκτης αστάθειας Lifted (LI ή LIFT) είναι παρόμοιος με τον δείκτη SHOW, αλλά στον δεύτερο όρο της εξίσωσης αντί για το επίπεδο των 850hPa χρησιμοποιείται το επίπεδο των 3000ft. Ο δείκτης προτάθηκε από τον J. G. Galway (Galway, 1956) και προέρχεται εάν από την τιμή που έχει η θερμοκρασία του αέρα στα 500hPa αφαιρεθεί η τιμή της θερμοκρασίας που αποκτά ο αέρας όταν μεταφερθεί αδιαβατικά από τα 3000ft στο επίπεδο των 500hPa.

$$LIFT = T_{500} - T_{lifted(3000\text{ ft}-500)} \quad (4.8)$$

Ο δείκτης LI μπορεί να υπολογιστεί, γραφικά, με τη χρήση του τεφιγράμματος, όπως αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3. Επίσης, μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια των εξισώσεων που περιγράφουν την ξηρή αδιαβατική (4.7) και την υγρή αδιαβατική (4.8), όπως δηλαδή υπολογίζεται και ο SI, μόνο που ως αρχική αναλογία μίγματος θεωρείται ο μέσος όρος αυτής για το στρώμα των πρώτων 3000ft από το έδαφος και ως αρχική θερμοκρασία η προγνωστική τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας ή η μέση θερμοκρασία του παραπάνω στρώματος.

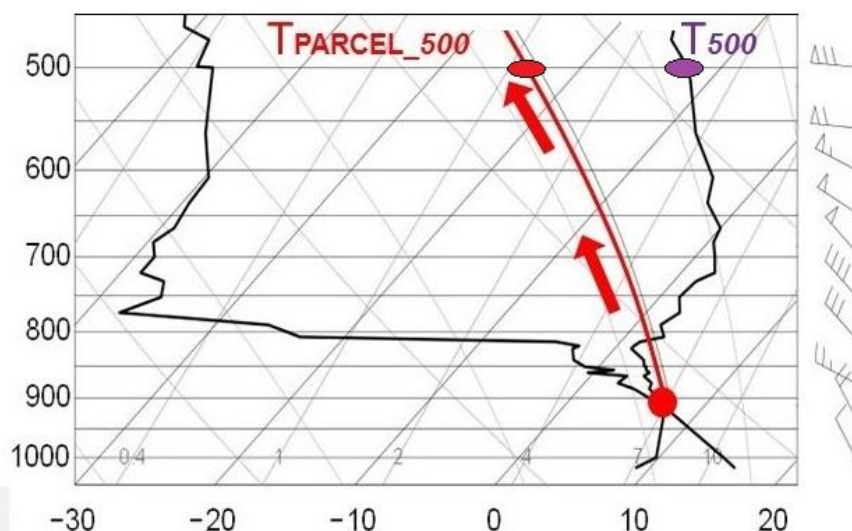
LIFTED INDEX

$$LIFT = T_{500} - T_{lift(3000ft-500)}$$

LIFT: δείκτης lifted

T_{500} : θερμοκρασία στο επίπεδο των 500hPa

T_{PARCEL_500} ή $T_{lift(3000ft-500)}$: θερμοκρασία αδιαβατικά ανυψούμενου δείγματος αέρα από το επίπεδο των 3000ft στο επίπεδο των 500hPa



Σχήμα 4.3: Γραφική απεικόνιση του δείκτη Lifted Index.

Γενικά, οι αρνητικές τιμές του δείκτη συνδέονται με πιθανότητα εκδήλωσης χαλαζοκαταιγίδων, η οποία αυξάνει όσο απολύτως μεγαλύτερες τιμές λαμβάνει ο δείκτης. Παρακάτω παρατίθενται τιμές του δείκτη LI σε σχέση με την κατάσταση ισορροπίας:

- 1) Όταν $LI > 0$, επικρατεί ευστάθεια
- 2) Όταν $-3 \leq LI \leq 0$, επικρατεί μικρή αστάθεια
- 3) Όταν $-6 \leq LI \leq -3$, επικρατεί μέτρια αστάθεια
- 4) Όταν $-9 \leq LI \leq -6$, επικρατεί μεγάλη αστάθεια
- 5) Όταν $LI \leq -9$, επικρατεί εξαιρετικά μεγάλη αστάθεια.

4.2.1.3 Δείκτης K (KI)

Δημιουργήθηκε, αρχικά, από τον Whiting και πήρε την τελική του μορφή από τον George (George, 1960). Ο δείκτης αστάθειας K (KI) σχετίζεται με τη θερμοβαθμίδα του στρώματος από τα 850hPa μέχρι τα 500hPa και τη θερμοκρασία του σημείου δρόσου στο επίπεδο των 850hPa. Δηλαδή, είναι μια απλή γραμμική σχέση μεταξύ των θερμοκρασιών των ισοβαρικών επιφανειών των 500, 700 και 850 hPa και των σημείων δρόσου των ισοβαρικών επιφανειών των 850 και 700 hPa, που δίδεται από τη σχέση:

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700}) \quad (4.9)$$

Οι τιμές της παραμέτρου της θερμοκρασίας και τη θερμοκρασίας δρόσου εκφράζονται όλες σε °C, όπως και η τιμή του KI που προκύπτει. Είναι προφανές ότι ο δείκτης υπολογίζεται απευθείας από τα δεδομένα των ραδιοβολίσεων. Παρ' όλα αυτά, στο Σχήμα 4.4 απεικονίζεται η φυσική σημασία του KI δείκτη, καθώς και ο δυνητικός γραφικός τρόπος υπολογισμού αυτού.

Ο δείκτης αυτός έχει να κάνει τόσο με την υγρασία στα κατώτερα στρώματα όσο και με την θερμική αστάθεια. Ενδείκνυται για περιοχές που πνέουν ασθενείς άνεμοι, σε περιπτώσεις απουσίας μετωπικών και κυκλωνικών συνθηκών. Χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την απόκλιση και το σχετικό στροβιλισμό μιας περιοχής.

Τιμές του KI μικρότερες του 20 είναι δηλωτικές της απουσίας εμφάνισης καταιγίδων, ενώ μεγαλύτερες του 35 είναι ενδεικτικές της επικράτησης πολλών καταιγίδων. Κατωτέρω παρουσιάζονται τα επικρατούντα κριτήρια εκδήλωσης καταιγίδων σύμφωνα με τον δείκτη K.

- 1) Όταν $20 < KI < 25$ εκδηλώνονται μεμονωμένες καταιγίδες

- 2) Όταν $25 < KI < 30$ εκδηλώνονται διάσπαρτες καταιγίδες
- 3) Όταν $30 < KI < 35$ εκδηλώνονται πιο εκτεταμένα διάσπαρτες καταιγίδες
- 4) Όταν $35 < KI$ εκδηλώνονται πολυάριθμες καταιγίδες

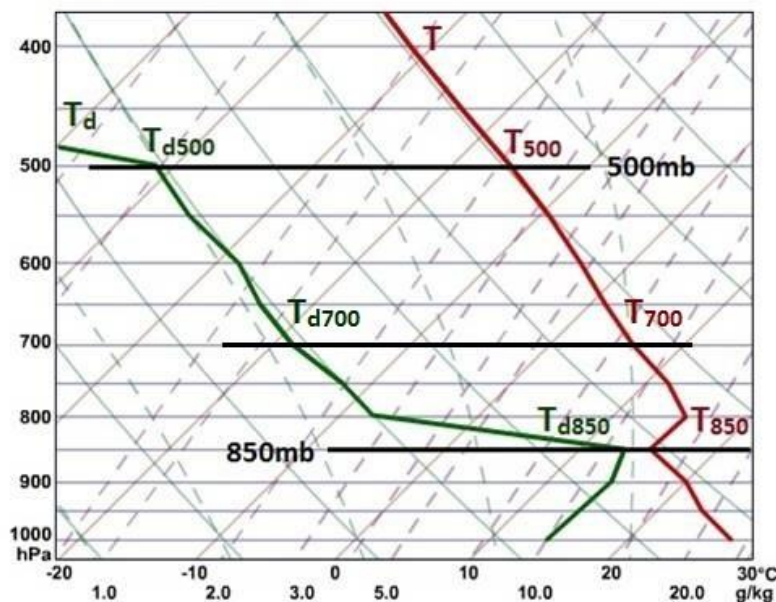
K INDEX

$$KINX = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700})$$

KINX: δείκτης K

T_k : θερμοκρασία στο επίπεδο των khPa

T_{dk} : θερμοκρασία του σημείου δρόσου στο επίπεδο των khPa



Σχήμα 4.4: Γραφική απεικόνιση του δείκτη K index.

4.2.1.4 Δείκτης CAPE (CAPE)

Ο δείκτης διαθέσιμης δυνητικής κινητικής ενέργειας ανοδικής μεταφοράς (CAPE) αντιπροσωπεύει την κατακόρυφη ολοκληρωμένη θετική ενέργεια αστάθειας ενός αδιαβατικά ανυψούμενου δείγματος αέρα. Ο CAPE παρέχει ένα εξαιρετικό μέτρο λανθάνουσας αστάθειας, καθώς η τιμή του είναι ανάλογη της κινητικής ενέργειας που αποκτά το δείγμα αέρα, επειδή είναι θερμότερο από το περιβάλλον του. Ωστόσο, σφοδρές καταιγίδες μπορούν να αναπτυχθούν σε μικρές μέχρι μέτριες τιμές CAPE, σε περιβάλλον έντονου διατμητικού ανέμου. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο διατμητικός άνεμος συνεισφέρει σε υποσυνοπτική, αλλά και σε μέσο-α και μέσο-β κλίμακα. Στην πρώτη περίπτωση, λόγω ενίσχυσης του

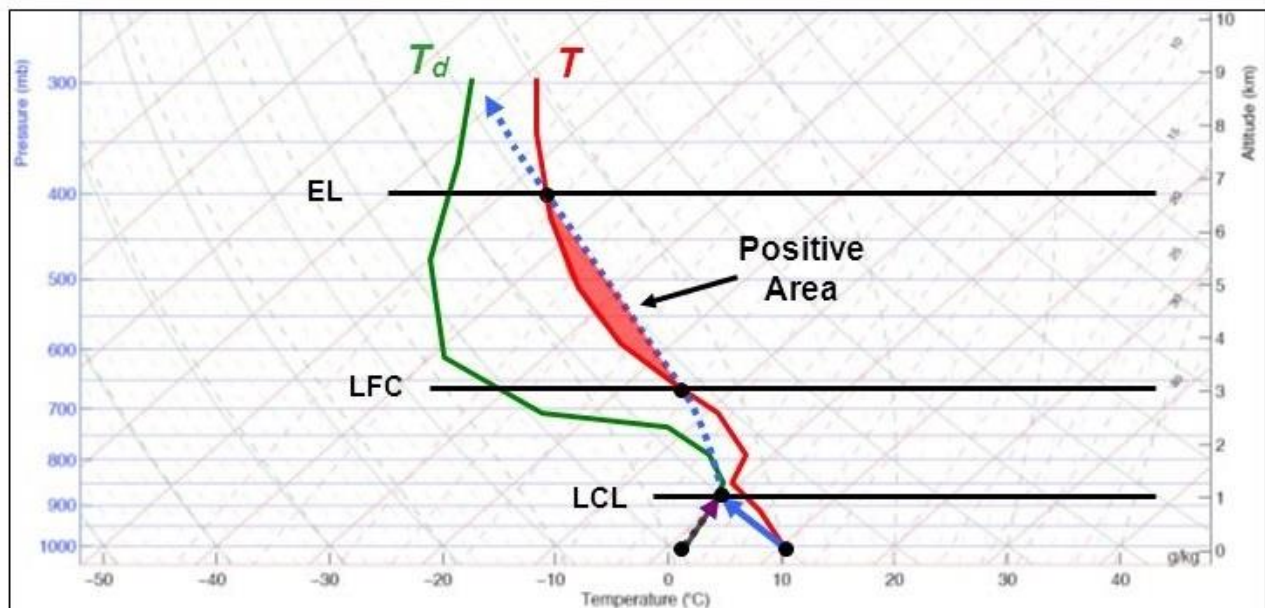
στροβιλισμού και επομένως της αστάθειας, και στη δεύτερη, λόγω ενίσχυσης των ανοδικών και καθοδικών ρευμάτων με αποτέλεσμα την αναζωογόνηση των κυττάρων και την αύξηση του χρόνου ζωής της καταιγίδας.

Στο Σχήμα 4.5 απεικονίζεται η φυσική σημασία του δείκτη CAPE, καθώς και ο δυνητικός γραφικός τρόπος υπολογισμού αυτού, καθώς και τα κριτήρια εκδήλωσης καταιγίδων σύμφωνα με τον δείκτη CAPE.

- 1) Όταν $CAPE < 0$ επικρατεί ευστάθεια
- 2) Όταν $0 \leq CAPE \leq 1000$ επικρατεί μικρή αστάθεια
- 3) Όταν $1000 \leq CAPE \leq 2500$ επικρατεί μέτρια αστάθεια
- 4) Όταν $2500 \leq CAPE \leq 3500$ επικρατεί μεγάλη αστάθεια
- 5) Όταν $CAPE \geq 3500 - 4000$ επικρατεί εξαιρετικά μεγάλη αστάθεια.

CAPE INDEX

Ο δείκτης CAPE υπολογίζεται όσο το εμβαδόν της γραμμοσκιασμένης περιοχής (Positive Area), πάνω από το επίπεδο LFC και μεταξύ της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της θερμοκρασίας του αδιαβατικά ανυψούμενου δείγματος αέρα.



Σχήμα 4.5: Γραφική απεικόνιση του δείκτη CAPE.

4.2.2 Διαθέσιμη υγρασία

Είναι αναμενόμενο, μια ξηρή ατμόσφαιρα, ακόμα κι αν υπάρχει αστάθεια, να μην ευνοεί τη δημιουργία και εκδήλωση χαλαζοκαταιγίδων. Για να δημιουργηθούν νεφροσταγόνες και να μπορέσουν να εξελιχθούν σε χαλαζόκοκκους, απαιτείται ικανή ποσότητα υδρατμών. Για την περιοχή μελέτης θεωρείται ότι βασική πηγή υγρασίας είναι η θαλάσσια αύρα η οποία μεταφέρει υδρατμούς από τον Θερμαϊκό κόλπο, με αποτέλεσμα τη συμβολή στη δημιουργία χαλαζοκαταιγίδων τις απογευματινές ώρες. Σημαντική είναι και η συμβολή στον εμπλουτισμό της ατμόσφαιρας με υδρατμούς και των μεθόδων άρδευσης των καλλιεργειών, για μεγάλο χρονικό διάστημα μέσα στο έτος. Επίσης, υποστηρίζεται ότι η ατμόσφαιρα της περιοχής τροφοδοτείται με υδρατμούς με τη μεταφορά υγρασίας από τη Μαύρη Θάλασσα, όπως αναφέρεται από τους Riley et al (1990). Το θέμα αυτό ίσως χρειάζεται περαιτέρω μελέτη.

4.2.2.1 Σχετική υγρασία στην επιφάνεια (RH_{SUR})

Μια από τις σημαντικότερες ενδείξεις για τη διαθέσιμη υγρασία είναι η μέτρηση της σχετικής υγρασίας στην επιφάνεια. Σχετική υγρασία ονομάζεται η αναλογία της πίεσης των υδρατμών ως προς την πίεση των κορεσμένων υδρατμών. Ο WMO αναφέρει ως ορισμό και το λόγο της αναλογίας μίγματος ως προς την κορεσμένη αναλογία μίγματος και, λόγω της προφανούς μικρότερης τιμής του από τη μονάδα, συνήθως εκφράζεται ως ποσοστό. Επομένως, τα ποσοστά 0% και 100% εκφράζουν εντελώς ξηρό και κορεσμένο αέρα αντίστοιχα.

4.2.2.2 Αναλογία μίγματος στην επιφάνεια (M_R_{SUR})

Η αναλογία μίγματος προκύπτει από την αναλογία της μάζας των υδρατμών ενός δείγματος ατμοσφαιρικού αέρα ως προς τη μάζα του περιεχόμενου σε αυτό το δείγμα ξηρού αέρα. Η τιμή της προκύπτει από τον παρακάτω τύπο και όχι άμεσα από τη χρήση κάποιου οργάνου.

$$r = \frac{0,622e}{p - e} \quad (4.10)$$

όπου P είναι η τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης και e η πίεση των υδρατμών.

Η αναλογία μίγματος παίρνει πολύ μικρές τιμές με τη μέγιστή της να φθάνει τα 0,04 gr/gr και είναι καθαρός αριθμός, χωρίς μονάδες μέτρησης.

4.2.3 Μικροφυσικοί και άλλοι παράγοντες

Υπάρχουν διαδικασίες ή συνθήκες οι οποίες δεν υπάγονται, τουλάχιστον άμεσα, σε κανέναν από τους παραπάνω παράγοντες και δεν περιγράφονται από τις προαναφερθείσες παραμέτρους, αλλά είναι σημαντικές για την ανάπτυξη και εκδήλωση μιας χαλαζοκαταιγίδας. Μία από αυτές είναι η θερμο-υγρομετρική κατάσταση της ατμόσφαιρας και του καταιγιδοφόρου νέφους, η οποία επηρεάζει σημαντικά τη δημιουργία, αλλά και την ενδεχόμενη πύξη και τήξη ενός χαλαζόκοκκου. Στη συνέχεια παρατίθενται κάποιες μετεωρολογικές παράμετροι που θεωρείται ότι χαρακτηρίζουν τις αντίστοιχες διαδικασίες.

4.2.3.1 Υετίσιμο ύδωρ (PWAT)

Το υετίσιμο ύδωρ είναι, γενικά, μια παράμετρος χαρακτηριστική της υγρομετρικής κατάστασης της ατμόσφαιρας, αλλά και σε περιπτώσεις χαλαζοκαταιγίδων (Τουρναβίτη, κ.ά., 1999) και ενδεικτική του δυνητικά διαθέσιμου ποσού υγρασίας που μπορεί να υποστηρίξει μία βροχόπτωση και μάλιστα μια χαλαζοκαταιγίδα (Καρακώστας και Σιούτας, 1992; Bradley and Smith, 1994).

Ως υετίσιμο ύδωρ ορίζεται η ποσότητα των υδρατμών της ατμόσφαιρας που περιέχεται σε μια κατακόρυφη στήλη μοναδιαίας τομής μεταξύ δύο συγκεκριμένων επιπέδων, αν οι υδρατμοί αυτοί συμπυκνωθούν και συλλεχθούν σε ένα δοχείο της ίδιας μοναδιαίας τομής. Ολικό υετίσιμο ύδωρ είναι αυτό που περιέχεται σε μια στήλη μοναδιαίας τομής που εκτείνεται μεταξύ της επιφάνειας της γης και της "κορυφής" της ατμόσφαιρας. Το υετίσιμο ύδωρ που περιέχεται σε ένα στρώμα που ορίζεται από δύο ισοβαρικές επιφάνειες P_1 και P_2 δίνεται από τη σχέση:

$$PW = \frac{1}{g} \int_{P_1}^{P_2} r(P) dP \quad (4.11)$$

όπου $r(P)$ η αναλογία μίγματος στο επίπεδο πίεσης P και g η επιτάχυνση της βαρύτητας (Μακρογιάννης και Σαχσαμάνογλου, 1994).

Θεωρώντας ένα αρκετά λεπτό στρώμα της ατμόσφαιρας, το ολοκλήρωμα της μαθηματικής έκφρασης του υετίσιμου ύδατος μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά από την ποσότητα $(r_i + r_{i-1})dP/2$.

Έτσι, το υετίσιμο ύδωρ για το ατμοσφαιρικό στρώμα που ορίζεται από τα επίπεδα πίεσης P_{i-1} και P_i υπολογίζεται από τη σχέση:

$$PW_{i/i-1} = \frac{1}{g} \left(\frac{r_{i-1} + r_i}{2} \right) (P_{i-1} - P_i) \quad (4.12)$$

όπου $g=9.81 \text{ m/s}^2$, r σε gr/gr και P σε hPa . Η αναλογία μίγματος r για κάθε επίπεδο πίεσης P υπολογίζεται από τη σχέση:

$$r = 0.622 \frac{e}{p - e} \quad (4.13)$$

όπου e η μερική πίεση των υδρατμών στο θεωρούμενο επίπεδο, η οποία υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (Lowe, 1977):

$$e_{\text{sat}} = \alpha_0 + (\alpha_1 + T(\alpha_2 + T(\alpha_3 + T(\alpha_4 + T(\alpha_5 + \alpha_6 T)))) \quad (4.14)$$

για $T=T_d$ (αφού $e(T)=e_{\text{sat}}(T_d)$):

Με βάση τα παραπάνω, το υετίσιμο ύδωρ οποιουδήποτε στρώματος της τροπόσφαιρας μπορεί να υπολογιστεί, θέτοντας κάθε φορά τα όρια του. Τα όρια αυτά μπορεί να είναι βασικές στάθμες, ή επίπεδα πίεσης που σχετίζονται με σημαντικές για τη δημιουργία και εκδήλωση χαλαζοκαταιγίδας παραμέτρους, όπως κάποιες χαρακτηριστικές ισοθέρμους ή επίπεδα συμπύκνωσης. Κατ' αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατός ο υπολογισμός του υετίσιμου ύδατος για οποιοδήποτε σημαντικό, για τη δημιουργία χαλαζοκαταιγίδας, στρώμα της ατμόσφαιρας.

4.2.3.2 Ύψος ισοθέρμου των -5°C (H_{-5})

Η ισόθερμη των -5°C προσδιορίζει περίπου το ύψος της ατμόσφαιρας πάνω από το οποίο αρχίζει η διαδικασία της παγοποίησης. Είναι καθοριστική για τη συγκέντρωση και τα χαρακτηριστικά των χαλαζόκοκκων που θα δημιουργηθούν πάνω από αυτό το επίπεδο με μια διαρκή ανοδική και καθοδική κυκλική πορεία (τοροειδής κίνηση), μέχρι που να εγκαταλείψουν το νέφος λόγω βαρύτητας. Επίσης, η θέση της στην ατμόσφαιρα επηρεάζει τη συγκέντρωση των υδρατμών που θα συμπυκνωθούν και θα αποτελέσουν τα έμβρυα χαλαζιού.

Αν και οι ισόθερμες του 0°C και των -10°C δεν χρησιμοποιούνται στη μελέτη αυτή, θεωρήθηκε σκόπιμο, συνοπτικά να αναφερθούν τα χαρακτηριστικά αυτών.

Η ισόθερμη του 0°C είναι χαρακτηριστική γιατί οι χαλαζόκοκκοι αναπτύσσονται, γενικά, σε θερμοκρασίες από 0°C μέχρι -40°C . Ο χαλαζόκοκκος κατά την πτώση του προς το έδαφος, μόλις εισέλθει στην περιοχή της ατμόσφαιρας με θερμοκρασίες μεγαλύτερες του μηδενός, υπόκειται σε

διαδικασίες ελάττωσής του, είτε μέσω της τριβής με τον ατμοσφαιρικό αέρα σε όλη τη διαδρομή του, είτε μέσω τήξης, λόγω της υψηλής, για τη διατήρησή του, θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Επομένως, όσο πιο ψηλά είναι η ισόθερμη του 0°C τόσο πιο λίγες πιθανότητες έχει να φτάσει το χαλάζι στο έδαφος. Γι' αυτό, άλλωστε, το καλοκαίρι οι καταιγίδες δίνουν λιγότερο συχνά χαλάζι απ' ό,τι την άνοιξη.

Η ισόθερμη των -10°C είναι καθοριστική για τα χαρακτηριστικά των χαλαζόκοκκων, αφότου πάρουν τη στερεά μορφή τους και πλέον υπόκεινται σε διαδικασίες αύξησης.

Η θερμοκρασία της βάσης του νέφους και το πάχος του θερμού τμήματος αυτού επηρεάζουν, σημαντικά, τις μικρής κλίμακας διεργασίες που συνεισφέρουν στην ανάπτυξη των χαλαζόκοκκων. Όσο πιο θερμή είναι η βάση του νέφους τόσο μεγαλύτερη αστάθεια απαιτείται για να φτάσει χαλάζι στο έδαφος (Wood, 1955). Επίσης, όσο πιο μεγάλο είναι το πάχος του θερμού τμήματος του νέφους, τόσο μειώνεται η πιθανότητα να δημιουργηθεί χαλάζι: οι σταγόνες, καθώς δημιουργούνται και αυξάνουν στο κατώτερο τμήμα του νέφους, είναι πιο πιθανό να λάβουν διαστάσεις τέτοιες, ώστε να αρχίσουν την πτώση τους προς το έδαφος, απ' ό,τι να εισέλθουν στην ψυχρή περιοχή του νέφους όπου και εξελίσσονται σε χαλαζόκοκκους. Έτσι, το νέφος, στις ψυχρότερες περιοχές του, είναι δυνατόν να παράγει μόνο νιφάδες χιονιού ή χιονοχάλαζα (graupel) (Appleman, 1959).

4.2.3.3 Δυνητική θερμοκρασία στο μέσο στρώμα ανάμιξης (MLTH)

Δυνητική θερμοκρασία ορίζεται ως η θερμοκρασία που θα αποκτήσει ένα δείγμα ξηρού αέρα μετά τη μεταφορά του αδιαβατικά στο επίπεδο των 1000hPa. Το στρώμα ανάμιξης καταλαμβάνει τα 3/4 του ασταθούς οριακού στρώματος στο οποίο, λόγω της ύπαρξης ισχυρών τυρβώδων στροβίλων, η ανάμιξη δημιουργήσε ομοιομορφία στην κατανομή της θερμοκρασίας (Ζάνης, 2017). Επομένως, η δυνητική θερμοκρασία στο μέσο στρώμα ανάμιξης είναι η τιμή της ομοιόμορφης πλέον δυνητικής θερμοκρασίας που έχει το μέσο στρώμα ανάμιξης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

5.1 ΜΙΑ ΠΡΩΤΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ: ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ

Στην προσπάθεια να συνδεθεί η μέγιστη ανακλαστικότητα του ραντάρ με μια σειρά θερμοδυναμικών παραμέτρων με σκοπό την ανίχνευση της μεταξύ τους σχέσης και τη δημιουργία μιας συνάρτησης της πρώτης ως προς τις άλλες, δημιουργήθηκε και εξετάστηκε ο πίνακας των συντελεστών γραμμικής συσχέτισης.

Οι συσχετίσεις, όπως αναφέρθηκε και στο δεύτερο κεφάλαιο, είναι ενδεικτικές της ενδεχόμενης γραμμικής σχέσης μεταξύ δύο παραμέτρων. Από τον πίνακα των συσχετίσεων προκύπτει ότι, στη συντριπτική πλειοψηφία τους, οι θεωρούμενες μετεωρολογικές παράμετροι παρουσιάζουν μια στατιστικά σημαντική ($\alpha=0.05$) γραμμική συσχέτιση με τη μέγιστη ανακλαστικότητα. Οι στατιστικά σημαντικοί συντελεστές συσχέτισης κυμαίνονται μεταξύ 0.54 και 0.08 με μέση τιμή 0.31 και τυπική απόκλιση 0.15.

Η γραμμική σχέση μεταξύ της μέγιστης ανακλαστικότητας και των διαφόρων μετεωρολογικών παραμέτρων δε φαίνεται, γενικά, να είναι ιδιαίτερα ισχυρή, ωστόσο δεν είναι και ασήμαντη. Ξεχωρίζουν κάποιοι δείκτες αστάθειας με ικανοποιητική γραμμική συσχέτιση με τη μέγιστη ανακλαστικότητα της ημέρας. Μια ισχυρή γραμμική σχέση μεταξύ της μέγιστης ανακλαστικότητας και κάποιας μετεωρολογικής παραμέτρου δεν θα ήταν και θεωρητικά αναμενόμενη με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία (Zak, 1977; Charba, 1975, Karacostas, 1990). Άλλωστε, η ανάπτυξη μιας χαλαζοκαταιγίδας είναι ένα αρκετά πολύπλοκο και σύνθετο φαινόμενο, στο οποίο υπεισέρχονται πολλοί παράγοντες

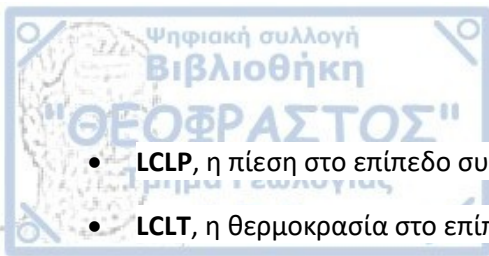
διαφόρων κλιμάκων χώρου και χρόνου, οι οποίες δεν είναι εύκολο να «περιγραφούν» αποκλειστικά και μόνο από μία μετεωρολογική παράμετρο.

Η γραμμική σχέση μεταξύ μετεωρολογικών και μη μεταβλητών είναι η πιο απλή σχέση που μπορεί να υπάρξει. Είναι, ωστόσο δυνατόν, να υπάρχει κάποια άλλη συνάρτηση αντιπροσωπευτική, ή πιο αντιπροσωπευτική της σχέσης μεταξύ ανακλαστικότητας και μιας μετεωρολογικής παραμέτρου. Με βάση αυτό το σκεπτικό, επιχειρήθηκε η ανίχνευση τέτοιων συναρτήσεων για καθεμιά από τις θεωρούμενες θερμοδυναμικές παραμέτρους. Για το σκοπό αυτό ελέγχθηκαν τα διαγράμματα διασποράς (scatterplots) και επιχειρήθηκε η προσαρμογή μη γραμμικών, ως προς τους συντελεστές, ή ως προς τις παραμέτρους, συναρτήσεων, με εξαρτημένη τη μέγιστη ανακλαστικότητα και ανεξάρτητη καθεμιά από τις μετεωρολογικές παραμέτρους που, άμεσα ή έμμεσα, επιδρούν, ή εκφράζουν τις συνθήκες δημιουργίας χαλαζοκαταιγίδων.

Τα διαγράμματα διασποράς ήταν ενδεικτικά της δυσκολίας να βρεθεί κάποια σχέση που να συνδέει με μεγάλη ακρίβεια την μέγιστη ανακλαστικότητα κατά τη διάρκεια μιας ημέρας με την τιμή κάποιας από τις θεωρούμενες μετεωρολογικές παραμέτρους που προκύπτουν από τη ραδιοβόλιση. Χρησιμοποιήθηκε, ωστόσο, μια σειρά συναρτήσεων για πιο σαφή και ακριβή αποτελέσματα: πολυωνυμικές, μέχρι και 3ου βαθμού, εκθετική, λογαριθμική και τριγωνομετρικές. Σε αρκετές περιπτώσεις, οι μη γραμμικές συναρτήσεις αποδείχθηκαν πιο αντιπροσωπευτικές των γραμμικών, χωρίς, ωστόσο, ο συντελεστής συσχέτισης αυτών να ξεπερνάει κατά περίπου 15% με 25%, τον αντίστοιχο του γραμμικού μοντέλου.

Βέβαια, δεν γίνεται να αγνοηθούν και οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των διαφόρων μετεωρολογικών παραμέτρων, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Α. Στην πλειοψηφία τους, οι συντελεστές συσχέτισης παρουσιάζονται στατιστικά σημαντικοί και καλύπτουν σχεδόν όλο το φάσμα τιμών (από 0 έως 1). Υψηλές συσχετίσεις παρουσιάζουν, γενικά, παράμετροι που ανήκουν στην ίδια κατηγορία και αυτό είναι εύλογο. Κατά τα άλλα, οι τιμές κυμαίνονται σε μέτρια επίπεδα.

Κατά την ανάλυση των δεδομένων για τη δημιουργία του αλγορίθμου, τα στοιχεία που εξετάστηκαν αφορούν ατμοσφαιρικές πιέσεις και γεωδυναμικά ύψη, θερμοκρασίες, ανέμους, αναλογίες μίγματος, σχετικές υγρασίες και ύψη χαρακτηριστικών θερμοκρασιών για τα διάφορα επίπεδα της ατμόσφαιρας. Έτσι, αναλυτικά μελετήθηκαν και ελέγχθηκαν οι παρακάτω μετεωρολογικοί παράμετροι:



- **LCLP**, η πίεση στο επίπεδο συμπύκνωσης από εξαναγκασμένη άνοδο,
- **LCLT**, η θερμοκρασία στο επίπεδο συμπύκνωσης από εξαναγκασμένη άνοδο,
- **MLTH**, η δυνητική θερμοκρασία στο μέσο στρώμα ανάμιξης,
- **TSUR**, η θερμοκρασία στην επιφάνεια,
- **T_dSUR**, το σημείο δρόσου στην επιφάνεια,
- **H₀**, το ύψος της ισόθερμου των 0 °C,
- **H₋₅**, το ύψος της ισόθερμου των -5 °C,
- **H₋₈**, το ύψος της ισόθερμου των -8 °C,
- **H_{do}**, το ύψος της ισόθερμου του μηδενός του σημείου δρόσου,
- **MLMR**, η αναλογία μίγματος στο μέσο στρώμα ανάμιξης,
- **MRSUR**, η αναλογία μίγματος στην επιφάνεια,
- **RHSUR**, η σχετική υγρασία στην επιφάνεια,
- **PWAT**, το υετίσιμο νερό και
- **THTK**, το πάχος του στρώματος από τα 500hPa έως τα 1000hPa.

Αντιπροσωπευτικοί των καιρικών συνθηκών της εκάστοτε ημέρας μπορούν να θεωρηθούν και οι δείκτες αστάθειας που εμφανίζονται και υπολογίζονται κατά τις ραδιοβολίσεις. Αυτοί οι οποίοι μελετήθηκαν και εξετάστηκαν είναι:

- **SHOW**, ο δείκτης Showalter,
- **LIFT**, ο δείκτης Lifted,
- **LFTV**, ο δείκτης LIFT υπολογισμένος με τη χρήση της αντίστοιχης θερμοκρασίας T_v,
- **SWEAT**, ο δείκτης SWEAT,
- **KINX**, ο δείκτης K,
- **CTOT**, ο δείκτης Cross Totals,
- **VTOT**, ο δείκτης Vertical Totals,
- **TOTL**, ο δείκτης Total Totals,
- **CAPE**, ο δείκτης Convective Available Potential Energy,
- **CAPV**, ο δείκτης CAPE υπολογισμένος με τη χρήση της αντίστοιχης θερμοκρασίας T_v,

- **CINS**, ο δείκτης Convective Inhibition,
- **CINV**, ο δείκτης CINS υπολογισμένος με τη χρήση της αντίστοιχης θερμοκρασίας T_v ,
- **EQLV**, το επίπεδο ισορροπίας (Equilibrium Level),
- **EQTV**, το EQLV υπολογισμένο με τη χρήση της αντίστοιχης θερμοκρασίας T_v ,
- **BRCH**, ο Bulk Richardson number και
- **BRCV**, ο BRCH υπολογισμένος με τη χρήση της αντίστοιχης θερμοκρασίας T_v .

Από τους προαναφερθέντες δείκτες, οι CINS, CINV, EQLV και EQTV εξαιρέθηκαν από τη μελέτη, λόγω των πολλών ελλিপών δεδομένων που εντοπίστηκαν κατά τη διαδικασία υπολογισμού αυτών κατά τις ημέρες ενδιαφέροντος.

Πριν από την έναρξη της επεξεργασίας των δεδομένων, και με τη χρήση γεννήτριας τυχαίων αριθμών, εξαιρέθηκε περίπου το 20% των συνολικών 256 ημερών, δηλαδή 50 ημέρες, με αντικειμενικό σκοπό τον μετέπειτα έλεγχο και επαλήθευση (επιβεβαίωση) των αποτελεσμάτων. Τέλος, κατά τη διάρκεια όλων των σταδίων ανάλυσης, επεξεργασίας, δημιουργίας του αλγορίθμου και βαθμονόμησης αυτού, συνολικά ένα ποσοστό της τάξης του 4,3% (αντιστοιχεί σε 11 ημέρες χαλαζοκαταιγίδων) χαρακτηρίστηκε ότι περιέχει (παράτυπα στοιχεία – outliers), λόγω κυρίως λανθασμένων μετρήσεων των στοιχείων των ραδιοβολίσεων, και γι' αυτό διαγράφηκε.

Επομένως, όπως αναφέρθηκε, η επεξεργασία των δεδομένων αφορά σε 256 ημέρες χαλαζόπτωσης, εκ των οποίων εξαιρέθηκαν 50 τυχαία επιλεγόμενες ημέρες για την μετέπειτα επαλήθευση - επιβεβαίωση, αλλά και 4 επειδή περιείχαν ακραίες και μη αξιόπιστες μετρήσεις. Για τις εναπομείναντες 202 ημέρες χαλαζόπτωσης μελετήθηκαν 26 δείκτες και παράμετροι.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ο πίνακας συσχετίσεων (correlation matrix) των 26 μεταβλητών μεταξύ τους, με αντικειμενικό σκοπό τη μη χρήση των μεταβλητών που συσχετίζονται άμεσα με κάποια από τις υπόλοιπες. Η συσχέτιση εκτελέστηκε με τη χρήση του προγράμματος statistica και ως μεταβλητές με μεγάλη μεταξύ τους συσχέτιση (1,00) αποδείχθηκαν τα ζεύγη LIFT-LFTV, CAPE-CAPV και BRCH-BRCV. Λόγω αυτού, οι μεταβλητές LFTV, CAPV και BRCV αποκλείστηκαν από την περαιτέρω επεξεργασία.

Ο πίνακας συσχετίσεων (correlation matrix) παρουσιάζεται στον Πίνακα 1 του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Α.

Έπειτα από την επεξεργασία, ανάλυση και μελέτη όλων των δεδομένων, της 3ετίας που μελετήθηκε, προέκυψε ότι οι πιο αξιόπιστες παράμετροι για τον χαρακτηρισμό και την απόδοση μιας ημέρας με χαλαζοκαταιγίδα είναι οι δείκτες: SHOW, LIFT και KINX, καθώς και οι τιμές αναλογίας μίγματος στην επιφάνεια (MRSUR), σχετικής υγρασίας στην επιφάνεια (RHSUR), δυνητικής θερμοκρασίας στο μέσο στρώμα ανάμιξης (MLTH), υετίσιμου νερού (PWAT) και το ύψος της ισόθερμου των -5°C (H_{-5}).

Οι παραπάνω παράμετροι, επειδή περιγράφουν τις συνθήκες δημιουργίας χαλαζοκαταιγίδων (αστάθεια και υγρασία), φαίνεται να είναι παρεμφερείς αυτών που χρησιμοποίησαν και άλλοι ερευνητές για τη δημιουργία δεικτών και μοντέλων πρόγνωσης. Οι Φλόκας και Καρακώστας (1988) χρησιμοποίησαν 4 παραμέτρους για τη δημιουργία του δείκτη FK με τη μέθοδο *stepwise*, ενώ οι Karacostas et al. (1991) χρησιμοποίησαν τις ίδιες 4 παραμέτρους για τη δημιουργία του δείκτη TK-4 με τη χρήση συντελεστών βαρύτητας. Επίσης, η Τουρναβίτη (1999) δημιούργησε ένα μοντέλο 6 παραμέτρων, ενώ για την πρόγνωση δυναμικών και θερμικών καταιγίδων τα μοντέλα περιείχαν 6 και 4 παραμέτρους, αντίστοιχα. Τέλος, η Στολάκη (2004) δημιούργησε ένα μοντέλο με τη χρήση 5 παραμέτρων.

Ως στατιστικό κριτήριο, πέραν του υπολογισμού των συντελεστών συσχέτισης, έπρεπε να εξεταστεί και η στάθμη σημαντικότητας αυτών. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του στατιστικού πακέτου SPSS με σκοπό την επιβεβαίωση ότι η συσχέτιση των παραπάνω 8 παραμέτρων με τη μέγιστη ανακλαστικότητα, και επομένως η συμμετοχή τους στην εξίσωση, δεν αποτελεί τυχαίο γεγονός. Οι πίνακες με τους ελέγχους σημαντικότητας των 8 παραμέτρων, που προέκυψαν από την Ανάλυση Διακύμανσης ANOVA, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Α.

5.2 ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΗΣ ΕΞΑΡΤΗΜΕΝΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΜΕ ΤΙΣ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ

5.2.1 Επιλογή των ανεξάρτητων μεταβλητών

Οι 23 πλέον μεταβλητές που επιλέχθηκαν με τα γενικά κριτήρια της «μετεωρολογίας» και της

«στατιστικής», εξετάστηκαν ως προς τη συσχέτισή τους με τη μέγιστη ανακλαστικότητα. Τα δεδομένα των 23 παραμέτρων, για κάθε μια από τις 202 ημέρες, χρησιμοποιήθηκαν στη δημιουργία εξισώσεων, γραμμικών ή μη, μεταξύ αυτών και της ημερήσιας μέγιστης ανακλαστικότητας. Για την επιλογή της βέλτιστης εξίσωσης, οι τύποι που ελεγχθήκαν ήταν η γραμμική, η λογαριθμική, η εκθετική, η υπερβολική και η πολυωνυμική 2^{ης}, 3^{ης} και 4^{ης} τάξης. Έτσι, για κάθε μια των εξισώσεων προέκυψε και ο αντίστοιχος συντελεστής συσχέτισης.

Με γνώμονα λοιπόν τους συντελεστές συσχέτισης που προέκυψαν, αλλά και τη φυσική σημασία των παραμέτρων, για τη δημιουργία μιας εξίσωσης μεταξύ αυτών και της μέγιστης ανακλαστικότητας, επιλέχθηκαν 8 από αυτές (Πίνακας 5.1).

Όσον αφορά τη φυσική τους σημασία, οι δείκτες πληρούν τα κριτήρια τα οποία απαιτούνται για τη δημιουργία της χαλαζοκαταιγίδας. Για την ύπαρξη χαλαζιού πρέπει να υπάρχει κάποιο δυναμικό αίτιο, η ατμόσφαιρα πρέπει να είναι ασταθής και τα κατώτερα στρώματά της να χαρακτηρίζονται από υγρασία. Η τελευταία προσδιορίζεται από τη σχετική υγρασία στην επιφάνεια, την αναλογία μίγματος στην επιφάνεια και το υετίσιμο νερό. Για την αποτύπωση της αστάθειας χρησιμοποιούνται οι δείκτες αστάθειας και η δυνητική θερμοκρασία του μέσου στρώματος ανάμιξης, ενώ το δυναμικό αίτιο αποδίδεται με τον δείκτη LIFT.

Όσον αφορά στους συντελεστές συσχέτισης, κατά σειρά, χρησιμοποιήθηκε η MRSUR με συντελεστή συσχέτισης 0,64, η PWAT με συντελεστή συσχέτισης 0,58, η MLTH με συντελεστή συσχέτισης 0,56, η SHOW με συντελεστή συσχέτισης 0,48, η LIFT με συντελεστή συσχέτισης 0,42, η KINX με συντελεστή συσχέτισης 0,41, η H-5 με συντελεστή συσχέτισης 0,39 και η RHSUR με συντελεστή συσχέτισης 0,3. Η εξίσωση που συνέδεε καλύτερα την καθεμιά με τη μέγιστη ανακλαστικότητα αποδείχθηκε ότι ήταν για την LIFT η πολυωνυμική 4^{ης} τάξης, για τις PWAT και RHSUR η πολυωνυμική 3^{ης} τάξης, για τις MRSUR, MLTH, H-5 και KINX η πολυωνυμική 2^{ης} τάξης και για την SHOW η γραμμική. Οι παραπάνω πληροφορίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Συντελεστές προσδιορισμού και συσχέτισης των 8 παραμέτρων με τη μέγιστη ανακλαστικότητα.

ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ		R ²	R
ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΜΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	MRSUR	0,40	0,64
ΥΕΤΙΣΙΜΟ ΥΔΩΡ	PWAT	0,34	0,58
ΔΥΝΗΤΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΑΝΑΜΙΞΗΣ	MLTH	0,31	0,56
ΔΕΙΚΤΗΣ SHOWALTER	SHOW	0,23	0,48
ΔΕΙΚΤΗΣ LIFTED	LIFT	0,18	0,42
ΔΕΙΚΤΗΣ K	KINX	0,17	0,41
ΥΨΟΣ ΙΣΟΘΕΡΜΟΥ ΤΩΝ -5°C	H ₅	0,15	0,39
ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	RHSUR	0,09	0,30

5.2.2 Επιλογή της αναλυτικής έκφρασης

5.2.2.1 Δημιουργία γραμμικού μοντέλου

Η πιο απλή και συνήθης μορφή που θα μπορούσε να παρουσιάσει ένα μοντέλο είναι αυτή της γραμμικής παλινδρόμησης. Σε πρώτο στάδιο εξετάστηκε η ακρίβεια που αποδίδει το μοντέλο-αλγόριθμος ως προς τη μέγιστη ανακλαστικότητα, εάν ως επιμέρους εξισώσεις των οκτώ μεταβλητών επιλεχθούν οι γραμμικές.

Με βάση τα γραφήματα και τις εξισώσεις που προκύπτουν από αυτά, σχηματίστηκε ο τελικός αλγόριθμος. Η τελική εξίσωση απαρτίζεται από το άθροισμα των δεύτερων μελών των επιμέρους 8 εξισώσεων, οι οποίες προηγουμένως έχουν πολλαπλασιαστεί με τον ανάλογο συντελεστή βαρύτητας. Ο συντελεστής βαρύτητας της κάθε επιμέρους εξίσωσης, όπως παρουσιάστηκε και προηγουμένως, προκύπτει από τον τύπο:

$$b_i = \frac{R_i}{\sum R} \quad (5.1)$$

όπου R_i είναι ο συντελεστής συσχέτισης της κάθε μεταβλητής, $\sum R$ είναι ο το άθροισμα των 8 συντελεστών συσχέτισης και το i παίρνει τιμές από 1 έως 8 για κάθε μια από τις 8 μεταβλητές.



Οι γραμμικές εξισώσεις που προέκυψαν ήταν οι εξής:

$$\text{maxdBz} = 0,1873(1,5384\text{MRSUR} + 44,44)$$

$$\text{maxdBz} = 0,1739(0,5313\text{PWAT} + 46,805)$$

$$\text{maxdBz} = 0,1390(0,6608\text{MLTH} - 134,33)$$

$$\text{maxdBz} = 0,1481(-1,1574\text{SHOW} + 64,512)$$

$$\text{maxdBz} = 0,0460(-0,1989\text{LIFT} + 62,089)$$

$$\text{maxdBz} = 0,1042(0,2544\text{KINX} + 55,116)$$

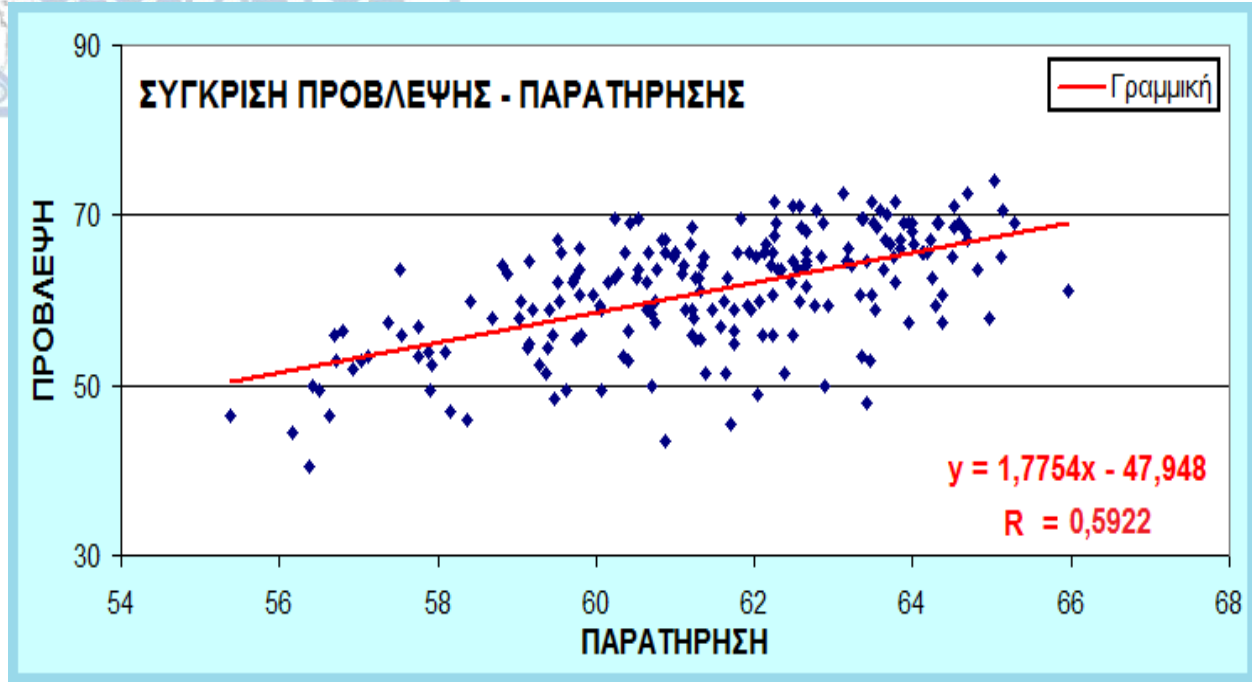
$$\text{maxdBz} = 0,1184(-0,0399\text{H}_{-5} + 85,438)$$

$$\text{maxdBz} = 0,0830(0,1225\text{RHSUR} + 53,778)$$

Συνδυάζοντας τα χαρακτηριστικά των δεδομένων των 202 ημερών χαλαζόπτωσης και συνθέτοντας τις 8 επιλεχθείσες παραμέτρους και κατ' επέκταση εξισώσεις, διαμορφώθηκε η τελική μαθηματική έκφραση πρόβλεψης – εκτίμησης χαλαζόπτωσης στην περιοχή ενδιαφέροντος της Κεντρικής Μακεδονίας.

$$\begin{aligned} \text{maxdBz} = & 0,845 \text{ MRSUR} + 0,642 \text{ PWAT} + 7,686 \text{ MLTH} - 0,147 \text{ SHOW} + \\ & + 0,013 (\text{H}_{-5}) + 0,186 \text{ LIFT} + 0,022 \text{ KINX} + 0,069 \text{ RHSUR} - 1093,56 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μια σύγκριση της μέγιστης ανακλαστικότητας που προέκυψε το παραπάνω μοντέλο – αλγόριθμος (εξίσωση 5.2) πρόβλεψης – εκτίμησης χαλαζοκαταιγίδας και της μέγιστης ανακλαστικότητας που καταγράφηκε από το ραντάρ και για τις 202 ημέρες. Ο βαθμός σύνδεσης, δηλαδή η συσχέτιση ($R=0,5922$), μεταξύ των προγνωστικών και των δεδομένων της παρατήρησης της μέγιστης ανακλαστικότητας, εκφραζόμενος σε ποσοστιαία αναλογία, έφτασε στο μόλις 59,22%. Αυτό αποδίδεται στο Σχήμα 5.1.



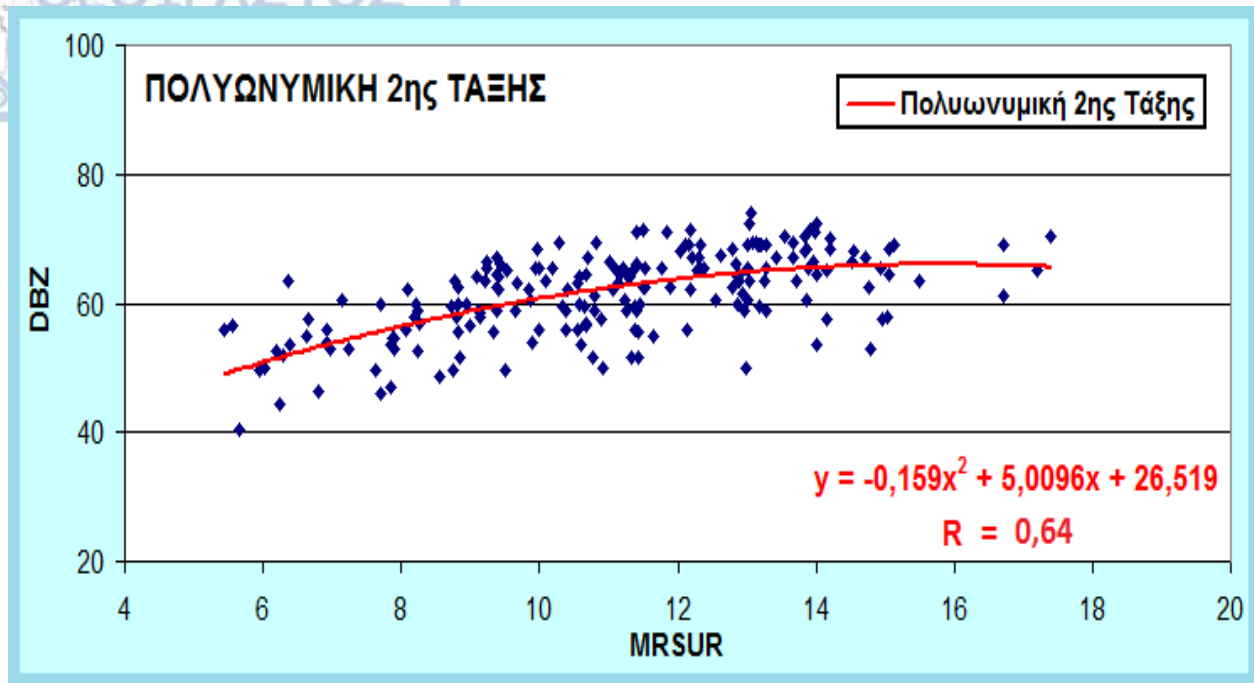
Σχήμα 5.1: Συσχέτιση μέγιστων ανακλαστικότητων (dBZ) μεταξύ παρατήρησης και πρόβλεψης (εξίσωση 5.2), για τις 202 ημέρες μελέτης.

Το ποσοστό αυτό, αν και το μοντέλο θεωρείται στατιστικά σημαντικό (Πίνακας 3, ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α), κρίνεται σχετικά μικρό και περίπου μη ικανοποιητικό, οδηγώντας σε περαιτέρω έρευνα ως προς την εύρεση και δημιουργία ενός βέλτιστου αλγορίθμου.

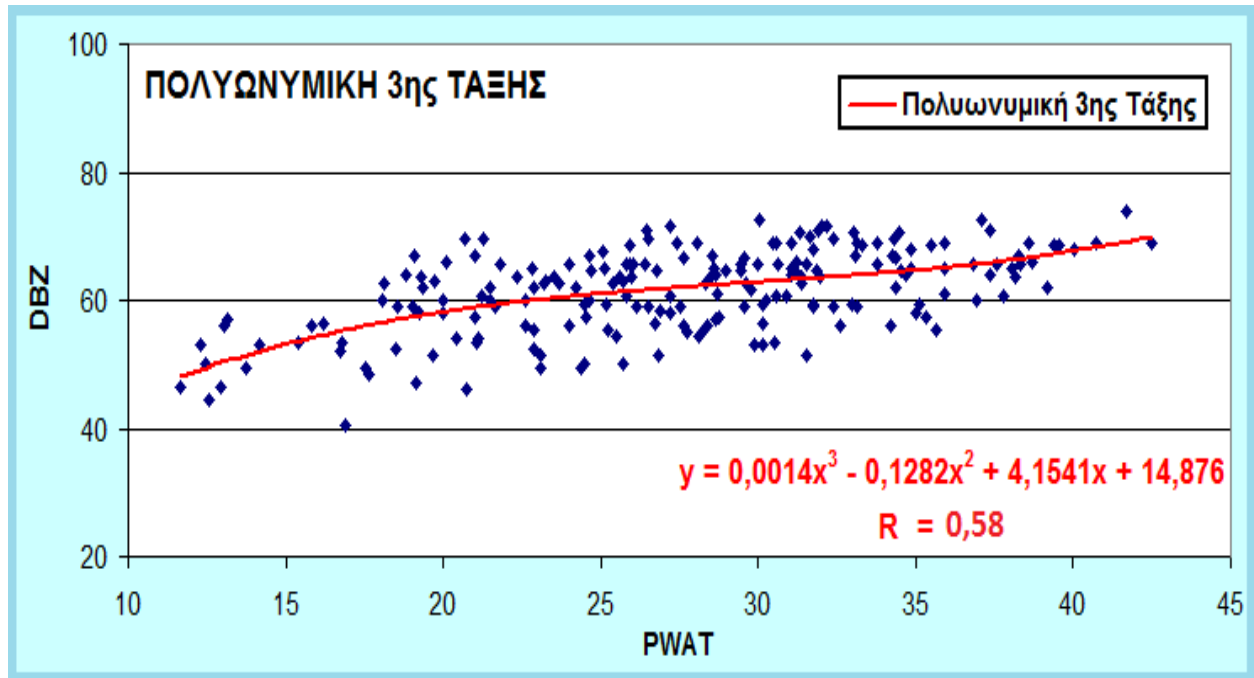
5.2.2.2 Δημιουργία μη γραμμικού μοντέλου

Το επόμενο βήμα είναι η αναζήτηση ενός μη γραμμικού μοντέλου. Η σκέψη αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι πολλές από τις ανεξάρτητες μεταβλητές σχετίζονται μη γραμμικά με την εξαρτημένη μεταβλητή. Έτσι, για τη μελέτη και δημιουργία ενός μη γραμμικού μοντέλου απαιτείται ο προσδιορισμός των εξισώσεων που συνδέουν την κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή με την εξαρτημένη.

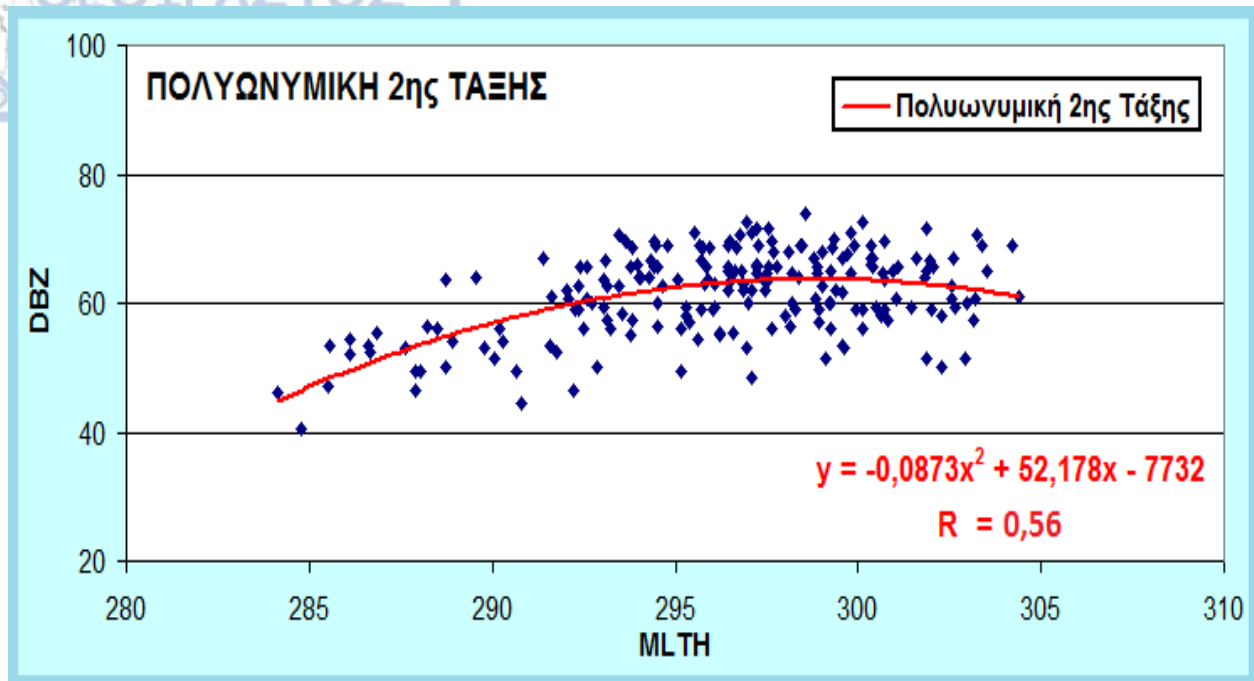
Παρακάτω, στα Σχήματα 5.2 έως και 5.9, παρουσιάζονται τα οκτώ γραφήματα για κάθε μια από τις μεταβλητές που εμφάνισαν τις μεγαλύτερες συσχετίσεις με τη μέγιστη ανακλαστικότητα, μαζί με την αντίστοιχη εξίσωση και το συντελεστή συσχέτισης.



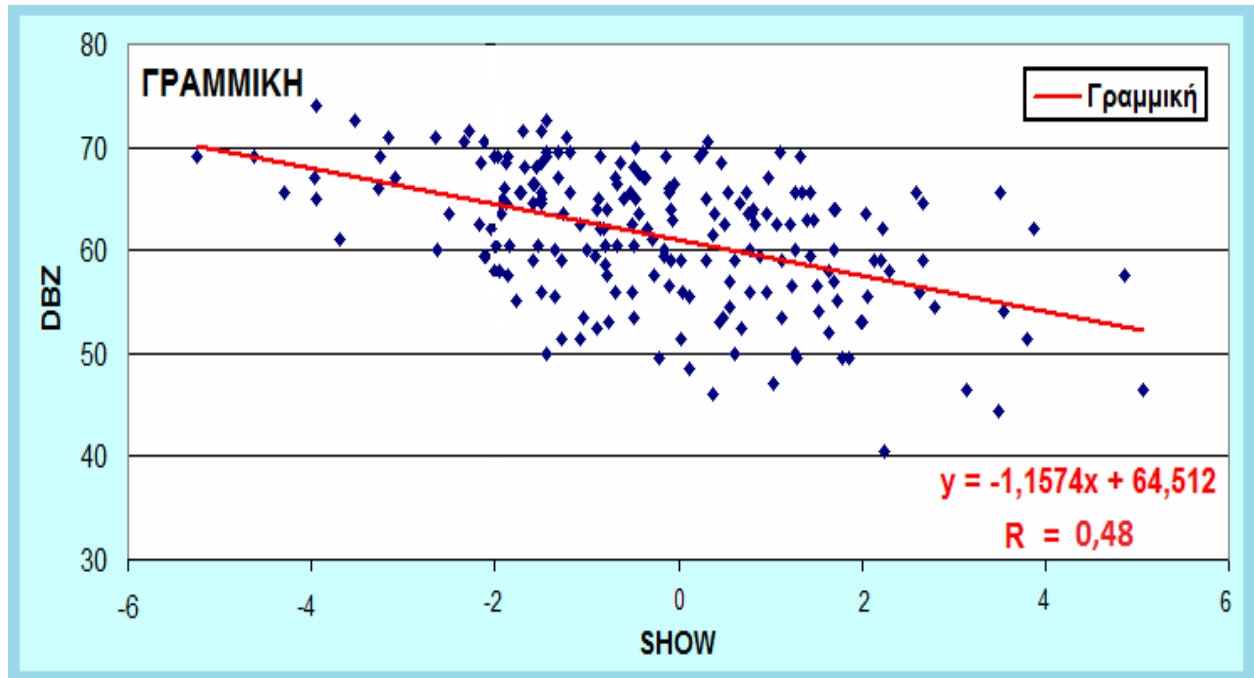
Σχήμα 5.2: Βέλτιστη συσχέτιση μεταξύ της παραμέτρου MRSUR (gr/gr) και της μέγιστης ανακλαστικότητας του ραντάρ (πολυωνυμική εξίσωση 2^{ης} τάξης).



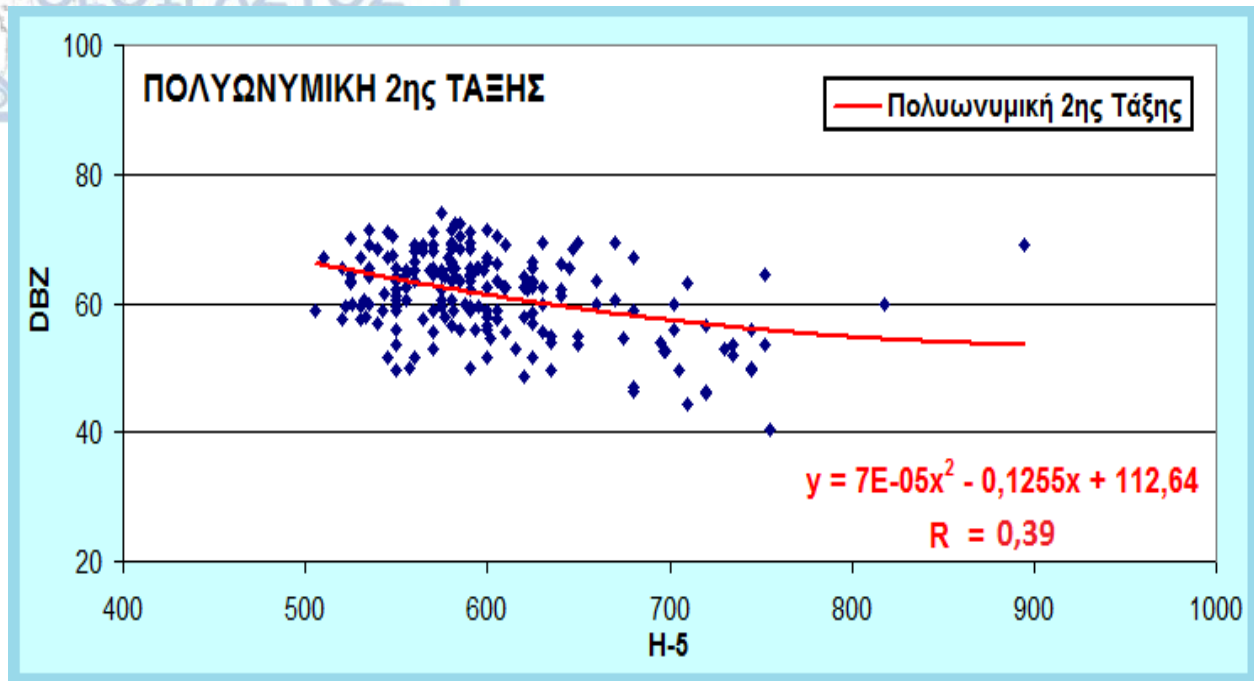
Σχήμα 5.3: Βέλτιστη συσχέτιση μεταξύ της παραμέτρου PWAT (Kgr/m²) και της μέγιστης ανακλαστικότητας του ραντάρ (πολυωνυμική εξίσωση 3^{ης} τάξης).



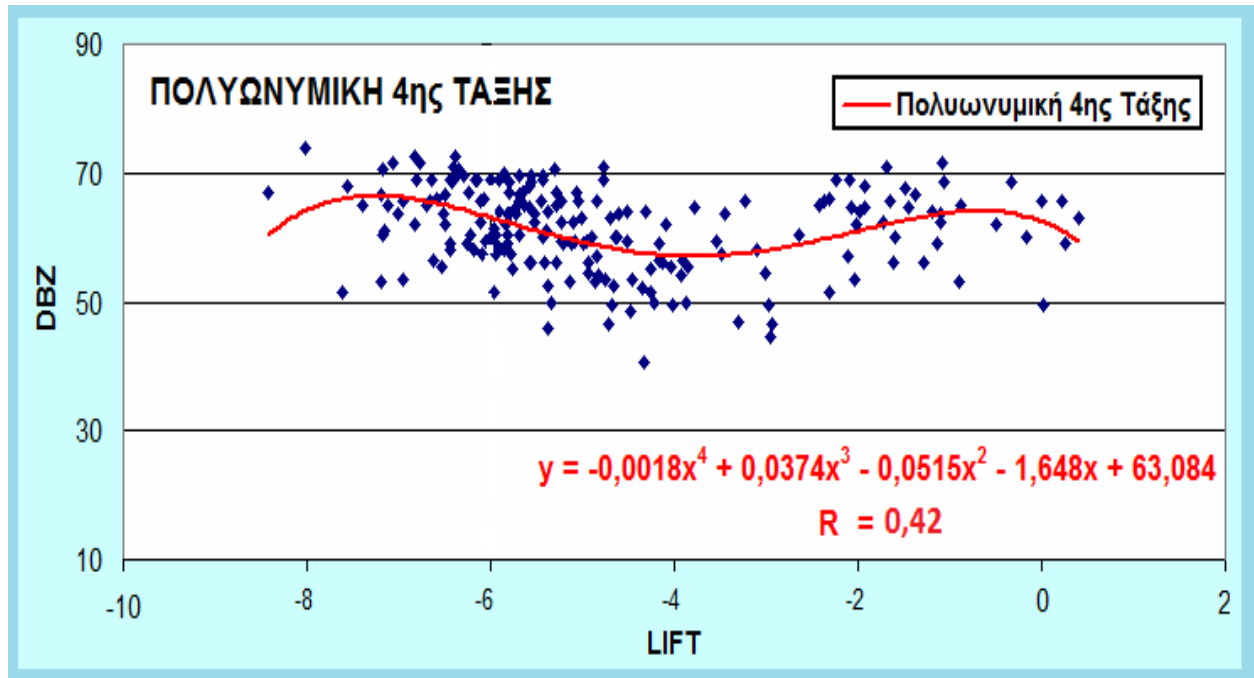
Σχήμα 5.4: Βέλτιστη συσχέτιση μεταξύ της παραμέτρου MLTH (°K) και της μέγιστης ανακλαστικότητας του ραντάρ (πολυωνυμική εξίσωση 2^{ης} τάξης).



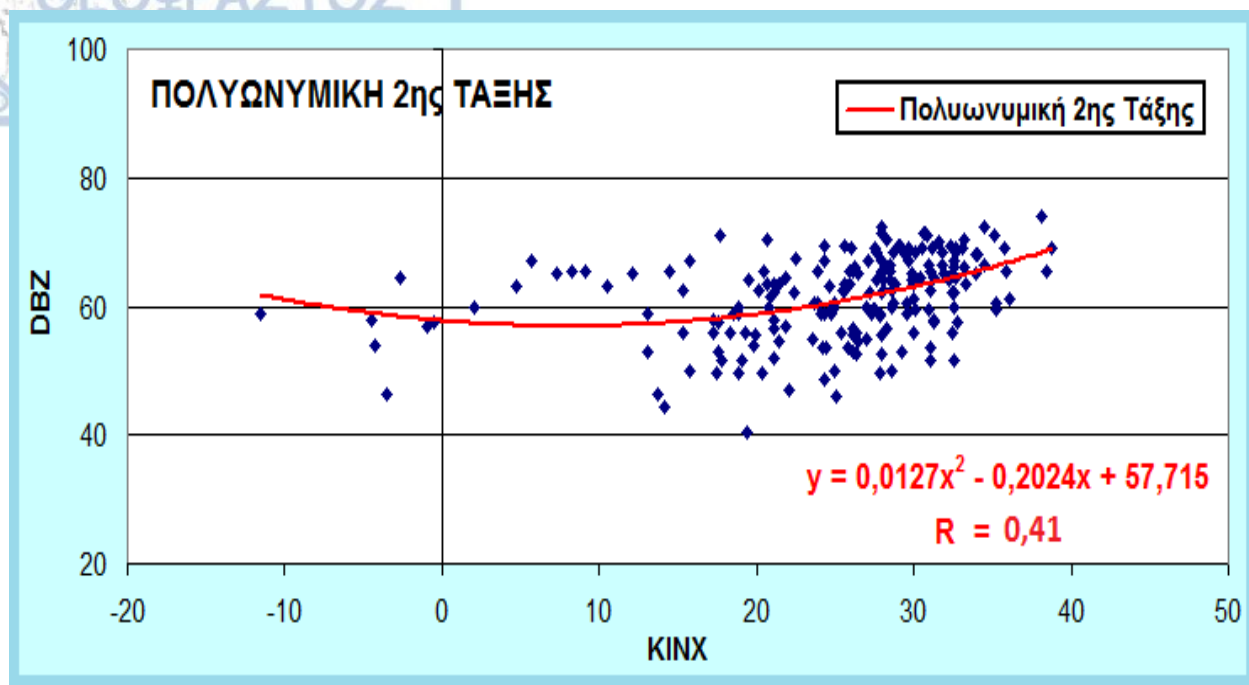
Σχήμα 5.5: Βέλτιστη συσχέτιση μεταξύ της παραμέτρου SHOW και της μέγιστης ανακλαστικότητας του ραντάρ (γραμμική εξίσωση).



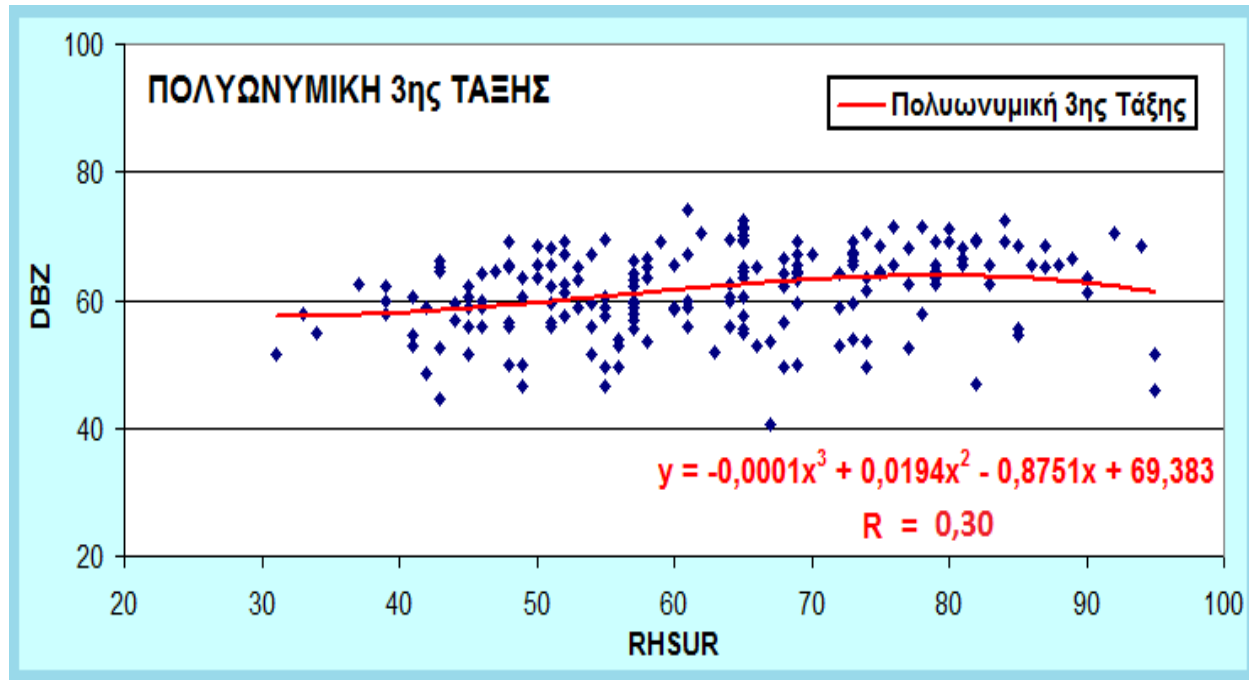
Σχήμα 5.6: Βέλτιστη συσχέτιση μεταξύ της παραμέτρου H₅ (°C) και της μέγιστης ανακλαστικότητας του ραντάρ (πολυωνυμική εξίσωση 2^{ης} τάξης).



Σχήμα 5.7: Βέλτιστη συσχέτιση μεταξύ της παραμέτρου LIFT και της μέγιστης ανακλαστικότητας του ραντάρ (πολυωνυμική εξίσωση 4^{ης} τάξης).



Σχήμα 5.8: Βέλτιστη συσχέτιση μεταξύ της παραμέτρου KINX και της μέγιστης ανακλαστικότητας του ραντάρ (πολυωνυμική εξίσωση 2^{ης} τάξης).



Σχήμα 5.9: Βέλτιστη συσχέτιση μεταξύ της παραμέτρου RHSUR και της μέγιστης ανακλαστικότητας του ραντάρ (πολυωνυμική εξίσωση 3^{ης} τάξης).

Επομένως, ο αλγόριθμος απαρτίζεται από το άθροισμα των όρων:

$$\max dB_z = 0,1686(-0,159MRSUR^2 + 5,0096MRSUR + 26,519)$$

$$\max dB_z = 0,1546(0,0014PWAT^3 - 0,1282PWAT^2 + 4,1541PWAT + 14,876)$$

$$\max dB_z = 0,1473(-0,0873MLTH^2 + 52,178MLTH - 7732)$$

$$\max dB_z = 0,1270(-1,1574SHOW + 64,512)$$

$$\max dB_z = 0,1029\{0,00007(H_{-5})^2 - 0,1255(H_{-5}) + 112,64\}$$

$$\max dB_z = 0,1126(-0,0018LIFT^4 + 0,0374LIFT^3 - 0,0515LIFT^2 - 1,648LIFT + 63,084)$$

$$\max dB_z = 0,1084(0,0127KINX^2 - 0,2024KINX + 57,715)$$

$$\max dB_z = 0,0786(-0,0001RHSUR^3 + 0,0194RHSUR^2 - 0,8751RHSUR + 69,383)$$

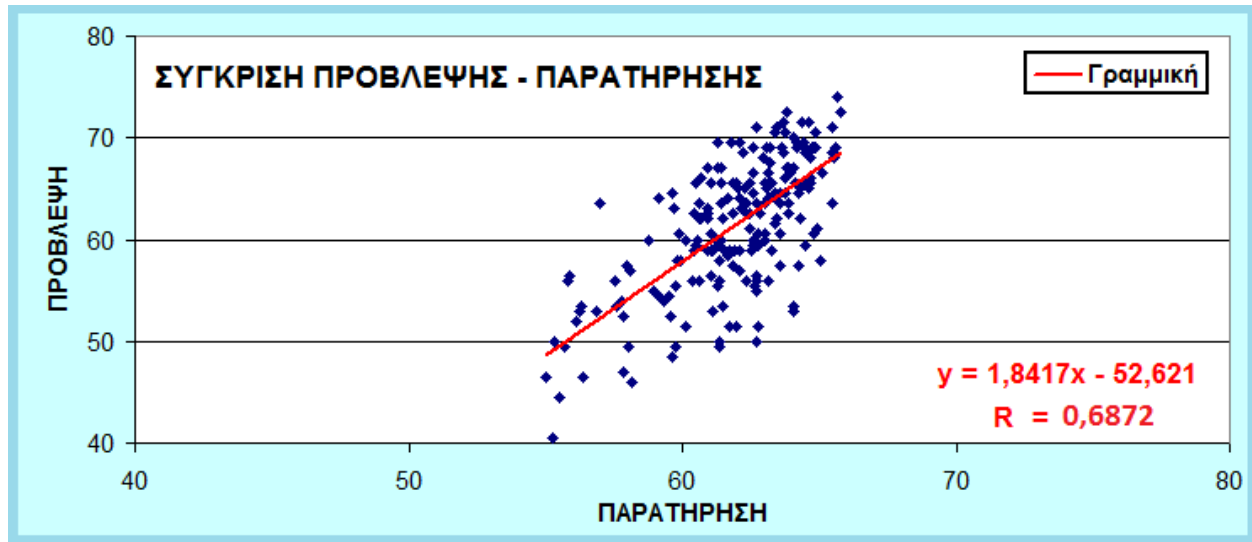
Επομένως, συνδυάζοντας εκ νέου τα χαρακτηριστικά των δεδομένων των 202 ημερών χαλαζόπτωσης και συνθέτοντας τις 8 επιλεγθείσες παραμέτρους και κατ' επέκταση τις νέες εξισώσεις, επτά (7) μη γραμμικές και μία (1) γραμμική, διαμορφώθηκε η τελική μαθηματική έκφραση πρόβλεψης – εκτίμησης χαλαζόπτωσης στην περιοχή ενδιαφέροντος της Κεντρικής Μακεδονίας.

$$\begin{aligned} \max dB_z = & -0,027 MRSUR^2 + 0,844 MRSUR + 0,00022 PWAT^3 - 0,012 PWAT^2 + \\ & + 0,642 PWAT - 0,0129 LTH^2 + 7,686 MLTH - 0,147 SHOW + 7,2 \cdot 10^{-6} (H_{-5})^2 - \\ & - 0,0129 (H_{-5}) - 0,0002 LIFT^4 + 0,0042 LIFT^3 - 0,0058 LIFT^2 - 0,1856 LIFT + \\ & + 0,00138 KINX^2 - 0,0219 KINX - 7,9 \cdot 10^{-6} RHSUR^3 + \\ & + 0,0015 RHSUR^2 - 0,0688 RHSUR - 1093,56 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Το παραπάνω μοντέλο – αλγόριθμος (εξίσωση 5.3) πρόβλεψης – εκτίμησης χαλαζοκαταιγίδας που προέκυψε από τη σύνθεση των μη γραμμικών σχέσεων των ανεξαρτήτων μεταβλητών με την εξαρτημένη, συγκρίθηκε ως προς την αξιοπιστία του με τις μέγιστες ανακλαστικότητες που καταγράφηκαν από το ραντάρ και για τις 202 ημέρες. Ο βαθμός σύνδεσης, δηλαδή η συσχέτιση ($R=0,6872$), μεταξύ των προγνωστικών και των δεδομένων της παρατήρησης της μέγιστης ανακλαστικότητας, εκφραζόμενος σε ποσοστιαία αναλογία, ήταν πλέον 68,72%. Αυτό αποδίδεται στο Σχήμα 5.1.

Παρακάτω παρατίθεται το γράφημα της γραμμικής εξίσωσης που συνδέει τις τιμές των

προγνωστικών (εξίσωση 5.3) και πραγματικών μέγιστων τιμών ανακλαστικότητας, καταδεικνύοντας το βαθμό της συσχέτισης αυτών (Σχήμα 5.10).



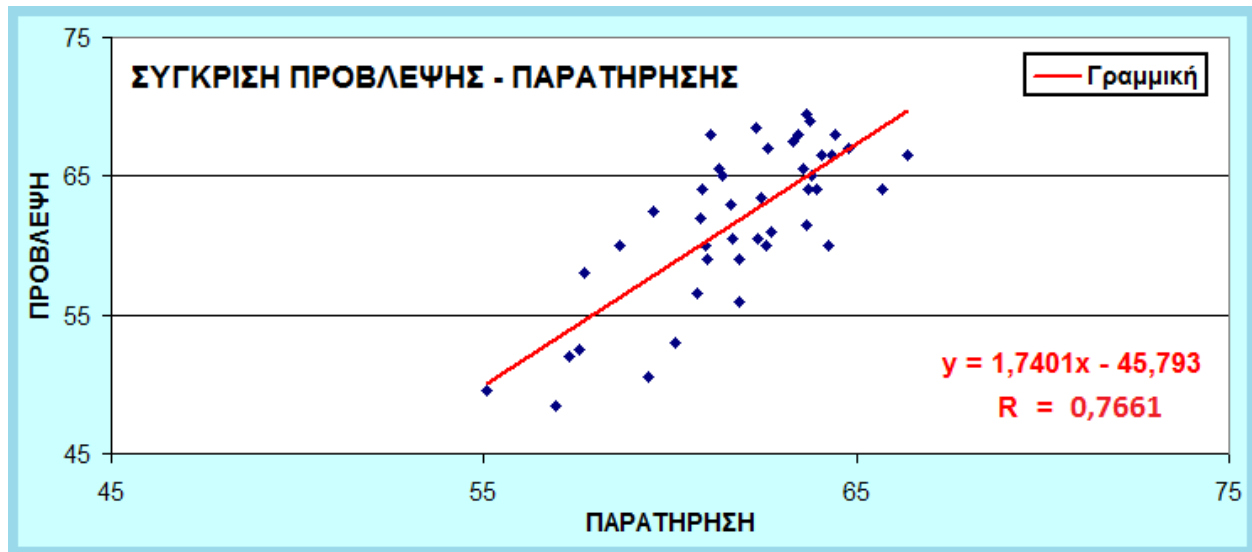
Σχήμα 5.10: Συσχέτιση μέγιστων ανακλαστικότητων (dBZ) μεταξύ παρατήρησης και πρόβλεψης (εξίσωση 5.3), για τις 202 ημέρες μελέτης.

Κατά συνέπεια, αποδεικνύεται ότι το παραπάνω μοντέλο - αλγόριθμος της μη γραμμικής παλινδρόμησης, το οποίο επίσης ελέγχθηκε για τη στατιστική σημαντικότητά του (Πίνακας 4, ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α), κατάφερε να προβλέψει και να αποδώσει με μεγαλύτερη και αποδεκτή ακρίβεια την εμφάνιση χαλαζοκαταιγίδων από το αντίστοιχο μοντέλο – αλγόριθμο (εξίσωση 5.2) της γραμμικής παλινδρόμησης.

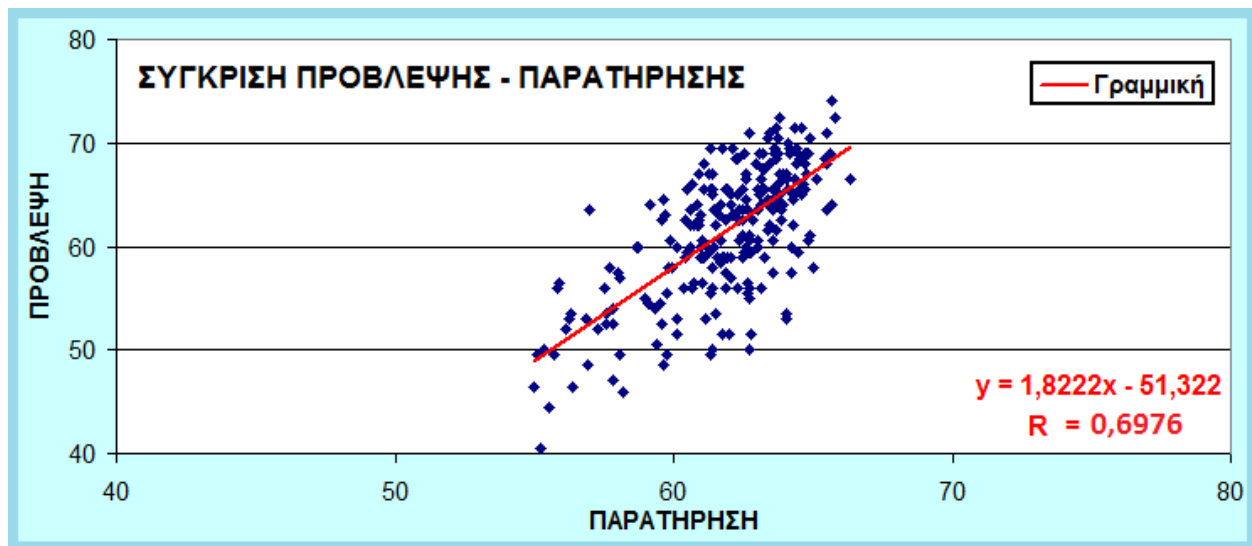
Στο πλαίσιο της διαδικασίας της αξιοπιστίας, επαλήθευσης και επιβεβαίωσης του μη γραμμικού μοντέλου-αλγορίθμου που προέκυψε, εφαρμόζεται αυτό (εξ. 5.3) στο σύνολο των δεδομένων που προέρχονται από τις 50 ημέρες χαλαζόπτωσης, που σκοπίμως δεν χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία δημιουργίας του αλγορίθμου και απομονώθηκαν για το σκοπό αυτό. Στο Σχήμα 5.11 απεικονίζεται η σύγκριση αυτή, που κατά κάποιο τρόπο παρουσιάζει την αξιοπιστία του μοντέλου-αλγορίθμου που προέκυψε. Ο βαθμός σύνδεσης, δηλαδή η συσχέτιση ($R=0,7661$), μεταξύ των προγνωστικών και των δεδομένων της παρατήρησης της μέγιστης ανακλαστικότητας, εκφραζόμενος σε ποσοστιαία αναλογία, ανήλθε σε ένα ποσοστό επιτυχίας της τάξεως του 76,61%.

Συμπεριλαμβάνοντας όλα τα διαθέσιμα δεδομένα, δηλαδή αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του μη γραμμικού μοντέλου-αλγορίθμου, καθώς και αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για την

επιβεβαίωσή του, προκύπτει, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.12, ένας πολύ ικανοποιητικός βαθμός σύνδεσης, δηλαδή συσχέτισης ($R=0,6976$), μεταξύ των προγνωστικών και των δεδομένων της παρατήρησης της μέγιστης ανακλαστικότητας, που εκφραζόμενος σε ποσοστιαία αναλογία, ήταν της τάξης του 70% (69,76%).



Σχήμα 5.11: Συσχέτιση μέγιστων ανακλαστικοτήτων (dBZ) μεταξύ παρατήρησης και πρόβλεψης για τις ημέρες επαλήθευσης – επιβεβαίωσης του μοντέλου-αλγορίθμου.



Σχήμα 5.12: Συσχέτιση μέγιστων ανακλαστικοτήτων (dBZ) μεταξύ παρατήρησης και πρόβλεψης για όλες τις ημέρες του δείγματος.

Το μοντέλο των Φλόκα και Καρακώστα (1988) απέδωσε συντελεστή συσχέτισης 0,72 και το μοντέλο των Karacostas et al. (1991) έδωσε συντελεστή συσχέτισης 0,74. Η Τουρναβίτη (1999) στο γενικό μοντέλο εμφάνισε συντελεστή συσχέτισης 0,84, ενώ σε αυτά που δημιουργήθηκαν χωριστά για τις δυναμικές και τις θερμικές καταιγίδες ήταν 0,83 και 0,91, αντίστοιχα. Τέλος, το μοντέλο της Στολάκη (2004) εμφάνισε συντελεστή συσχέτισης 0,76.

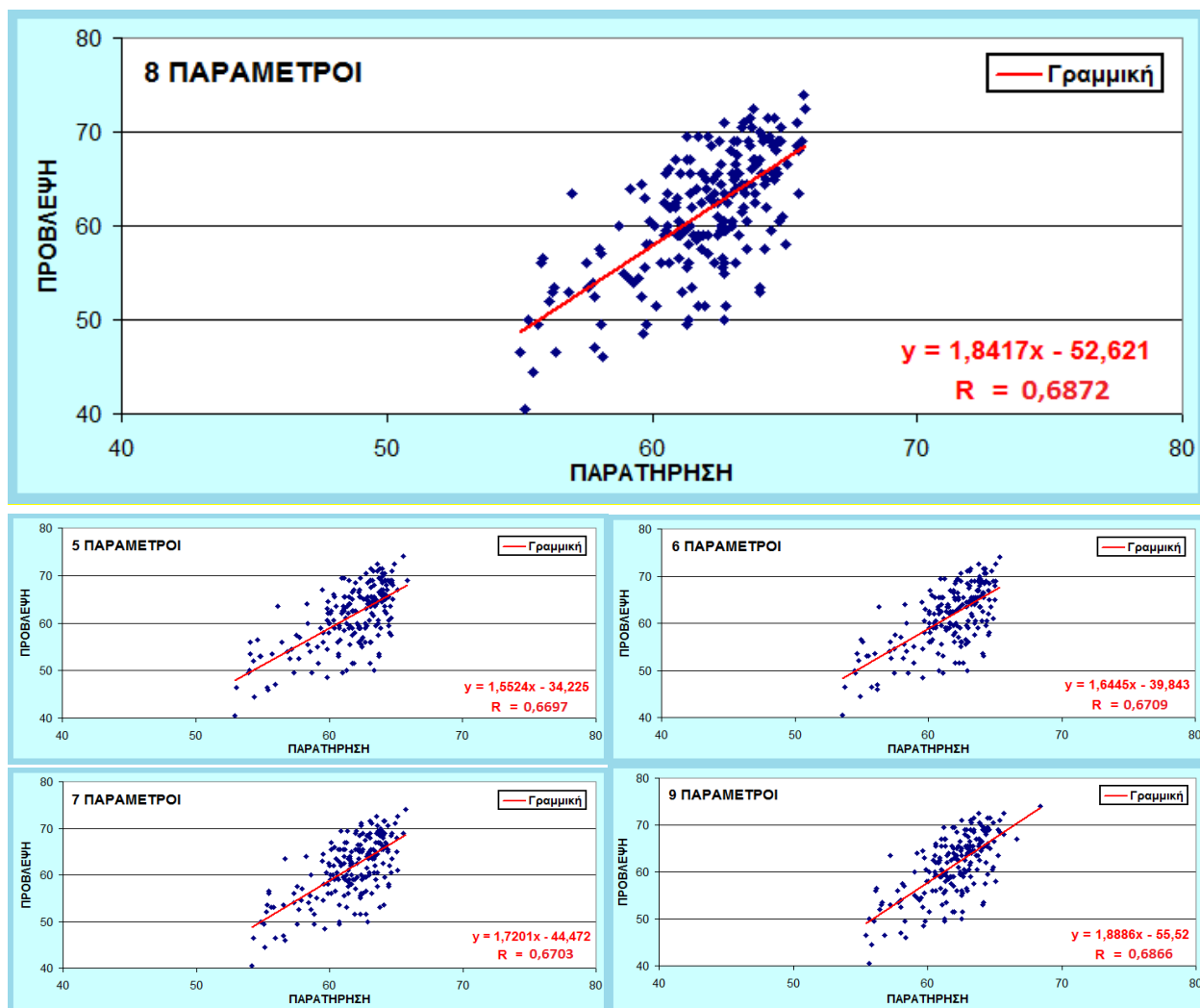
5.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Για τη δημιουργία του μοντέλου επιλέχθηκαν οκτώ (8) ανεξάρτητες μεταβλητές, οι οποίες πιστεύεται ότι περιγράφουν, ως επί το πλείστον, τη συμπεριφορά της εξαρτημένης μεταβλητής. Ωστόσο, για τον έλεγχο της ευαισθησίας, προσαρμογής και ευστάθειάς του, θα έπρεπε να ερευνηθεί και να διαπιστωθεί αν η ελάττωση ή η αύξηση του αριθμού των ανεξάρτητων μεταβλητών επηρεάζει και συνεισφέρει στη μεγαλύτερη ακρίβεια πρόγνωσης του μοντέλου.

Για την εύρεση της καλύτερης δυνατής απόδοσης της μέγιστης ανακλαστικότητας, η προηγούμενη διαδικασία πραγματοποιήθηκε για τις πρώτες 5, 6 και 7 μεταβλητές. Και στις τρεις περιπτώσεις τα ποσοστά επιτυχίας ήταν σχετικά μικρότερα του 68,72% που έδιναν οι 8 παράμετροι. Επίσης, έλεγχος έγινε και για την απόδοση της εξίσωσης με 9 μεταβλητές προσθέτοντας στις 8 ήδη υπάρχουσες το δείκτη CAPE. Και σε αυτήν την περίπτωση, το ποσοστό της συσχέτισης μεταξύ πραγματικών μετρήσεων και προγνωστικών ήταν λιγάκι μικρότερο του 68,72%. Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα ακριβή ποσοστά για τις 5, 6, 7, 8 και 9 παραμέτρους, αναδεικνύοντας κατά κάποιο τρόπο την ευστάθεια του μοντέλου. Αυτό ακριβώς αναδεικνύεται και στο Σχήμα 5.13, όπου απεικονίζονται οι συσχετίσεις των μέγιστων ανακλαστικότητων μεταξύ παρατήρησης και πρόβλεψης, οι οποίες προέκυψαν από τον αλγόριθμο με 8, 5, 6, 7 και 9 παραμέτρους, αντίστοιχα.

Πίνακας 5.2: Ποσοστά συσχέτισης πραγματικότητας - πρόγνωσης ανάλογα με τον αριθμό παραμέτρων στον αλγόριθμο.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΠΟΣΟΣΤΑ
5	66,97
6	67,09
7	67,03
8	68,72
9	68,66



Σχήμα 5.13: Συσχέτιση μέγιστων ανακλαστικότητας (dBZ) μεταξύ παρατήρησης και πρόβλεψης, η οποία προέκυψε από τον αλγόριθμο με 8, 5, 6, 7 και 9 παραμέτρους.

5.4 ΣΥΝΟΠΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΑΛΑΖΟΚΑΤΑΙΓΙΔΕΣ

5.4.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΗΜΕΡΩΝ ΧΑΛΑΖΟΠΤΩΣΕΩΝ ΑΝΑ ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Τα αρχικά και συνολικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη αυτή, ταξινομήθηκαν ανάλογα με τις συνοπτικές καταστάσεις που επικρατούσαν κατά τις ημέρες χαλαζόπτωσης, με σκοπό να ερευνηθεί η συμπεριφορά και αξιοπιστία πρόβλεψης του μοντέλου-αλγορίθμου σε κάθε μια κατηγορία από τις συνοπτικές καταστάσεις. Η επιλογή αυτή υιοθετείται, διότι η πληροφορία αυτή θα μπορούσε να συνεισφέρει αρκετά σε μια μελλοντική διαδικασία πρόγνωσης χαλαζοκαταιγίδων στην ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος, διότι υπεισέρχεται η παράμετρος της συνοπτικής και υπο-συνοπτικής κλίμακας. Δηλαδή, για τη σε βάθος μελέτη, κατανόηση και δυνητικότητα πρόβλεψης μιας χαλαζοκαταιγίδας, είναι σχεδόν απαραίτητος ο προσδιορισμός των συνοπτικών καταστάσεων, που κατά κάποιο τρόπο ευθύνονται για την εκδήλωση μιας χαλαζοκαταιγίδας. Για το λόγο αυτό, οι μετεωρολόγοι οδηγήθηκαν στην ομαδοποίηση, αλλά και διακριτοποίηση των συνοπτικών καταστάσεων, ανάλογα με τα κριτήρια που ορίζονται.

Όταν η κατάταξη γίνεται από τον ίδιο τον επιστήμονα-μετεωρολόγο, με βάση τη μελέτη και την παρατήρηση των συνοπτικών χαρτών καιρού, η κατάταξη λέγεται υποκειμενική. Αντίθετα, όταν η κατάταξη γίνεται με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών με χρήση αντικειμενικών κριτηρίων, λέγεται αντικειμενική, ή αυτόματη. Στην ευρύτερη περιοχή της Ελλάδας, αρκετοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τη δημιουργία υποκειμενικών, αλλά και αυτόματων κατατάξεων συνοπτικών καταστάσεων. Υποκειμενικές συνοπτικές καταστάσεις έχουν δημιουργηθεί από τους Livada (1962) («τύποι καιρού»), Flocas (1984) («τύποι καιρού»), Maheras (1988) («τύποι καιρού»), Καρακώστα κ.α. (1992) και Karacostas (2003), ενώ αυτόματες συνοπτικές καταστάσεις από τον Maheras (1984) και Maheras et al., (2000).

Στην μελέτη αυτή έχει χρησιμοποιηθεί η υποκειμενική κατάταξη του Καρακώστα κ.ά. (1992) και Karacostas (2003), που αναφέρεται στις συνοπτικές καταστάσεις που σχετίζονται με την εκδήλωση χαλαζοκαταιγίδας στην περιοχή ενδιαφέροντος. Η κατάταξη πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια των συνοπτικών χαρτών της 12 UTC που απεικονίζουν τη μέση κατάσταση της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας,

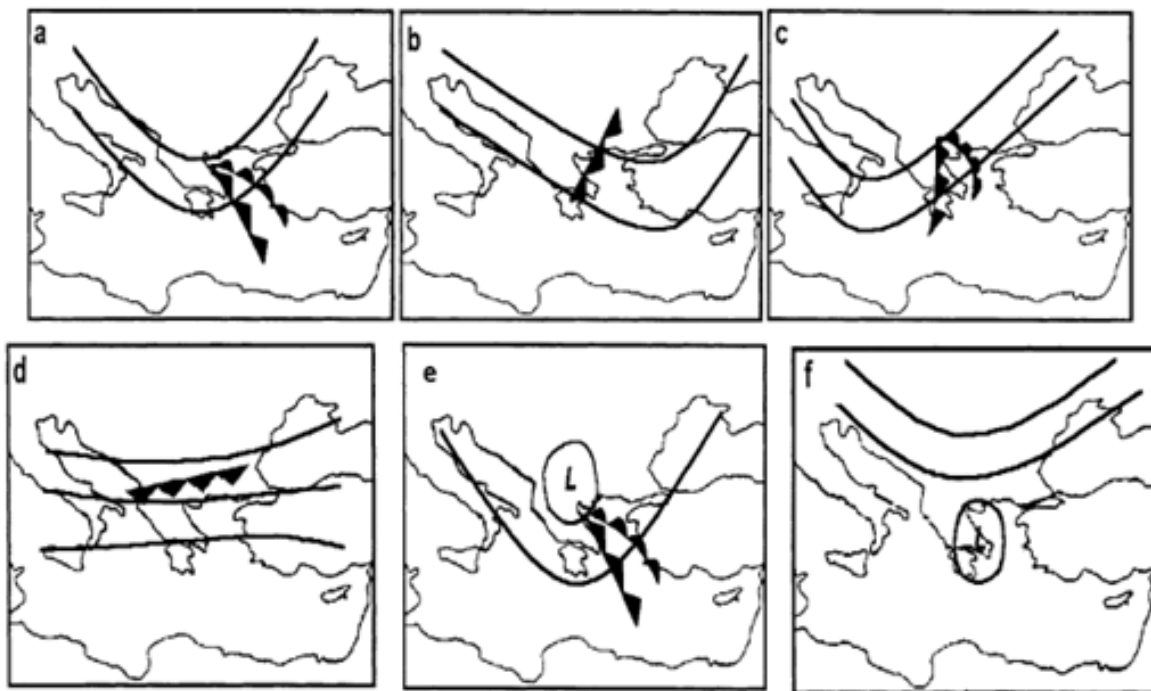
που επικρατεί πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος, για κάθε ημέρα εκδήλωσης χαλαζοκαταιγίδας.

Τα κριτήρια στα οποία βασίζεται η συγκεκριμένη κατάταξη, είναι η κυκλοφορία της ατμόσφαιρας, καθώς και η θέση και η κλίση του υπάρχοντος αυλώνα ή ράχης. Αφορά τις ισοβαρικές στάθμες των 300, 500, 700 και 850 hPa. Η πρώτη χαρακτηρίζει την ανώτερη τροπόσφαιρα, ενώ οι υπόλοιπες τρεις τη μέση και κατώτερη τροπόσφαιρα, εκεί δηλαδή που δημιουργούνται και αναπτύσσονται οι χαλαζοκαταιγίδες. Από την κατάταξη αυτή, σύμφωνα με τους Καρακώστα κ.α. (1992) και Karacostas (2003), προκύπτουν δέκα (10) διακριτές συνοπτικές καταστάσεις, τα χαρακτηριστικά των οποίων περιγράφονται παρακάτω:

- 1) **Ζωνική Κυκλοφορία (ZON):** Για την ένταξη σε αυτή την κατηγορία απαιτείται η ύπαρξη ενός αυλώνα χαμηλού πλάτους στο βόρειο τμήμα της περιοχής με την ταυτόχρονη ύπαρξη ράχης χαμηλού πλάτους νότια αυτής. Σε αυτή την περίπτωση κυριαρχούν δυτικοί άνεμοι, ενώ ψυχρότερες και θερμότερες αέριες μάζες παρατηρούνται βόρεια και νότια αντίστοιχα. Όσο μεγαλύτερη είναι η βαροβαθμίδα, τόσο ισχυρότεροι και οι άνεμοι που επικρατούν. Οι μικρότεροι κυματισμοί που αναπτύσσονται κινούνται αρκετά γρήγορα. Οι μετωπικές ζώνες στο κατώτερο επίπεδο της ατμόσφαιρας καθώς και τα μέτωπα στην επιφάνεια ακολουθούν τη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης.
- 2) **Βορειοδυτική Κυκλοφορία (NW):** Προϋποθέτει κυματισμό μεγάλου μήκους, ο αυλώνας του οποίου εμφανίζεται νοτιοανατολικά και η ράχη του βορειοδυτικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα και μικρού μήκους κυματισμοί να μετατοπίζονται σε βορειοδυτική τροχιά. Στην επιφάνεια οι χαμηλές πιέσεις βρίσκονται ανατολικά-βορειοανατολικά και οι υψηλές νότια-νοτιοδυτικά. Συνήθως δημιουργείται και ψυχρό μέτωπο νοτιοδυτικής-βορειοανατολικής διεύθυνσεως και κατά συνέπεια προκαλείται εισβολή ψυχρής αέριας μάζας από βόρεια ή βορειοδυτικά.
- 3) **Ανοιχτός Κυματισμός (L-1):** Σε αυτή την κατηγορία παρατηρείται αυλώνας ακριβώς πάνω από την περιοχή η οποία μελετάται, ο οποίος μετακινείται με πολύ αργούς ρυθμούς, ενώ χαρακτηριστική είναι η απουσία κλειστών ισοϋψών. Αυτό έχει ως συνέπεια ήπια ανώτερη ροή και η αέρια μάζα να παρουσιάζει μια μέτρια αστάθεια. Συνήθως, συνοδεύεται με ένα βαρομετρικό χαμηλό στην επιφάνεια και ένα υψηλό στα βορειοδυτικά του, με αποτέλεσμα βόρεια-βορειοδυτική ροή.
- 4) **Κλειστό χαμηλό (L-2):** Αυτή η κατάσταση εμφανίζεται συνήθως μετά την εμφάνιση του ανοιχτού κυματισμού. Τα στοιχεία που την συνδέουν με την εκάστοτε περίπτωση είναι παρόμοια με αυτά

της προηγούμενης κατηγορίας με τη διαφορά ότι πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον μια κλειστή ισοϋψής στον κυματισμό μεγάλου μήκους. Επομένως, η κατάσταση είναι πιο οργανωμένη με το χαμηλό ενδυναμωμένο και την αέρια μάζα πλέον σχεδόν ασταθή.

- 5) **Αποκομμένο χαμηλό (L-3):** Χαρακτηρίζεται ως συνέχεια των δύο προηγούμενων συνοπτικών καταστάσεων κατά την οποία το χαμηλό, αποτελούμενο από κλειστές ισοϋψείς, αποκόπτεται από τη γενική κυκλοφορία. Αυτό, καθώς βρίσκεται στην κατάσταση αποδυνάμωσης, παραμένει στατικό και κατακόρυφο σε όλα τα ισοβαρικά επίπεδα, ενώ η δυναμική του ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική, με αποτέλεσμα την κίνησή του βορειοανατολικά. Στην επιφάνεια παρατηρούνται χαμηλές πιέσεις στα ανατολικά και υψηλές βόρεια ή βορειοδυτικά. Η διαδικασία διαρκεί περισσότερο από τις μέχρι τώρα προαναφερθείσες.
- 6) **Νοτιοδυτική Κυκλοφορία (SW):** Παρατηρείται μεγάλου μήκους κυματισμός του οποίου η ράχη βρίσκεται βορειοανατολικά και ο αυλώνας νοτιοδυτικά της χαρακτηριζόμενης περιοχής. Ταυτόχρονα, μικρού μήκους κυματισμοί μετατοπίζονται νοτιοδυτικά και στην επιφάνεια παρουσιάζονται μέτωπα με εμφανή θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά.
- 7) **Ανοιχτός Κυματισμός (H-1):** Σε αυτή τη συνοπτική κατάσταση δεν παρατηρούνται κλειστές ισοϋψείς, αλλά μια ράχη επάνω από την περιοχή έρευνας. Αυτή μπορεί να έχει κατακόρυφο άξονα ή ο άξονας της να παρουσιάζει κλίση.
- 8) **Κλειστό Υψηλό (H-2):** Όμοια με προηγουμένως και ως εξέλιξη του ανοιχτού κυματισμού, η κατάσταση διατηρεί τα ίδια χαρακτηριστικά. Ωστόσο, πλέον εμφανίζεται τουλάχιστον μια κλειστή ισοϋψής.
- 9) **Ωμέγα Σχηματισμός (OME):** Η ονομασία προήλθε από τη διάταξη τριών συστημάτων, ενός υψηλού και δύο χαμηλών, τα οποία σχηματίζουν το γράμμα Ω της ελληνικού αλφαβήτου. Λόγω αυτής της διάταξης οι υφέσεις αδυνατούν να μετακινηθούν ανατολικά, με αποτέλεσμα για λίγες (3-4) ημέρες να παραμένουν στάσιμα ή να κινηθούν γύρω από το σχηματισμένο Ω.
- 10) **Συνδυασμός H-L:** Συμπεριλαμβάνονται οι περιπτώσεις στις οποίες συνδυάζονται υψηλά με χαμηλά και δεν πληρούν τις προϋποθέσεις για την κατάταξή τους σε κάποια από τις προηγούμενες καταστάσεις.



Σχήμα 5.14: Απεικόνιση των συνοπτικών καταστάσεων που συνεισφέρουν περισσότερο στη δημιουργία και ανάπτυξη χαλαζοκαιγίδων στην περιοχή ενδιαφέροντος: a) Ανοιχτός κυματισμός, b) Βορειοδυτική κυκλοφορία, c) Νοτιοδυτική κυκλοφορία, d) Ζωνική κυκλοφορία, e) Κλειστό χαμηλό, f) Αποκομμένο χαμηλό. (πηγή: Sioutas and Floca, 2003).

Από τις προαναφερθείσες δέκα (10) συνοπτικές καταστάσεις, οι κυριότερες σε σχέση με τη δημιουργία και ανάπτυξη χαλαζοκαταιγίδων, σύμφωνα με τον αριθμό εμφάνισής τους, κατά φθίνουσα σειρά είναι: οι κυκλωνικές (L-1, L-2 και L-3), η νοτιοδυτική κυκλοφορία (SW), η βορειοδυτική κυκλοφορία (NW) και η ζωνική κυκλοφορία (ZON). Πιο συγκεκριμένα, οι κυκλωνικές καταστάσεις συμπεριλαμβάνουν τον ανοικτό κυματισμό (L-1), το κλειστό χαμηλό (L-2) και το αποκομμένο χαμηλό (L-3). Με βάση τα παραπάνω, στο Σχήμα 5.14 απεικονίζονται αυτές οι έξι (6) συνοπτικές καταστάσεις που συνεισφέρουν περισσότερο στη δημιουργία και ανάπτυξη χαλαζοκαιγίδων στην περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας.

Το σύνολο των ημερών χαλαζόπτωσης που ανήκουν στις συνοπτικές καταστάσεις που γενικά περιγράφονται ως κυκλωνικές καταστάσεις είναι 80 από τις 245 ημέρες χαλαζόπτωσης που είναι διαθέσιμες ως δεδομένα επεξεργασίας και επαλήθευσης. Αυτό σκιαγραφεί το 32,65%, δηλαδή περίπου το 1/3 των συνολικών ημερών χαλαζόπτωσης ανήκουν στην κατηγορία των κυκλωνικών καταστάσεων.

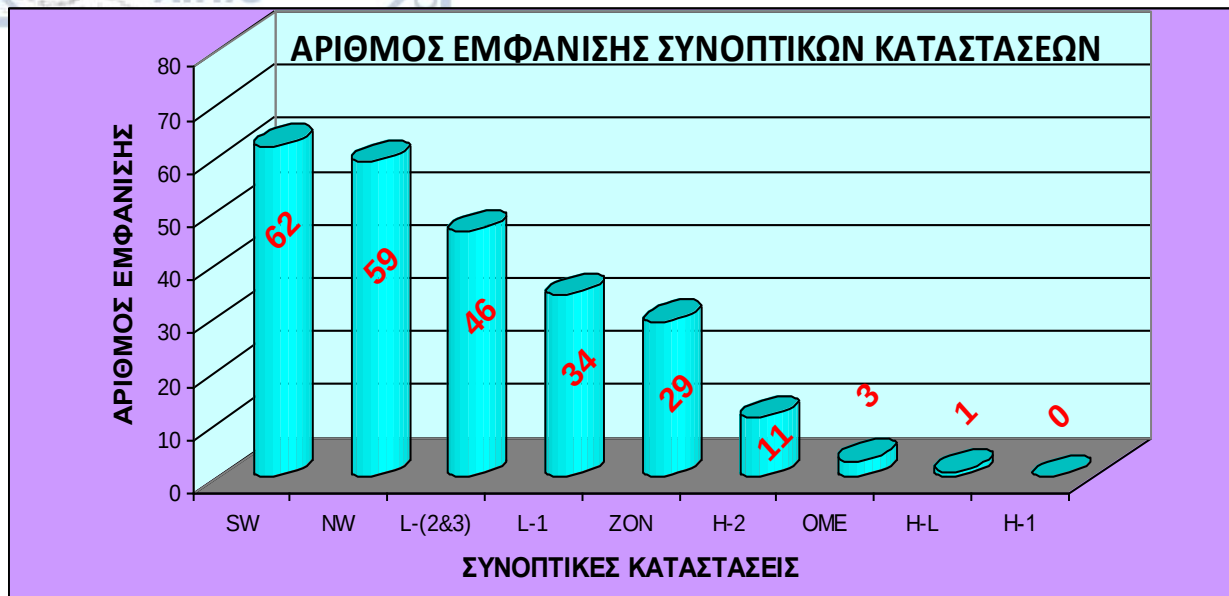
Αναλυτικότερα, το σύνολο των ημερών που κατατάχθηκαν στις συνοπτικές καταστάσεις του κλειστού και αποκομμένου χαμηλού (L-2 και L-3) ήταν 46 από τις 245 ημέρες που ήταν διαθέσιμες ως δεδομένα επεξεργασίας και επαλήθευσης. Αυτό υποδεικνύει ότι το 18,77% των συνολικών ημερών ανήκουν στην κατηγορία του κλειστού ή αποκομμένου χαμηλού, δηλαδή των συνοπτικών συστημάτων που παρουσιάζουν τουλάχιστον μια κλειστή ισοϋψή καμπύλη. Το σύνολο των ημερών που κατατάχθηκαν στη συνοπτική κατάσταση του ανοιχτού κυματισμού (L-1) ήταν 34 από τις 245 ημέρες που ήταν διαθέσιμες ως δεδομένα επεξεργασίας και επαλήθευσης. Αυτό υποδεικνύει ότι το 13,88% των συνολικών ημερών ανήκουν στην κατηγορία του ανοιχτού κυματισμού.

Το σύνολο των ημερών χαλαζόπτωσης που κατατάχθηκαν στη συνοπτική κατάσταση της νοτιοδυτικής κυκλοφορίας (SW) είναι 62 από τις 245 ημέρες που είναι διαθέσιμες ως δεδομένα επεξεργασίας και επαλήθευσης. Αυτό υποδηλώνει ότι το 25,31% των ημερών χαλαζόπτωσης, δηλαδή περίπου το 25%, των συνολικών ημερών χαλαζόπτωσης ανήκουν στην κατηγορία της νοτιοδυτικής κυκλοφορίας. Το σύνολο των ημερών χαλαζόπτωσης που αντιστοιχεί στη συνοπτική κατάσταση της βορειοδυτικής κυκλοφορίας (NW) είναι 59 από τις 245 ημέρες που ήταν διαθέσιμες ως δεδομένα επεξεργασίας και επαλήθευσης. Αυτό καταδεικνύει ότι το 24,08% των ημερών χαλαζόπτωσης, δηλαδή ελαφρώς μικρότερο από το 25%, των συνολικών ημερών ανήκουν στην κατηγορία της βορειοδυτικής κυκλοφορίας. Επομένως, αθροιστικά οι ημέρες χαλαζόπτωσης της βορειοδυτικής και νοτιοδυτικής κυκλοφορίας καλύπτουν το 50% του αριθμού των συνολικών ημερών.

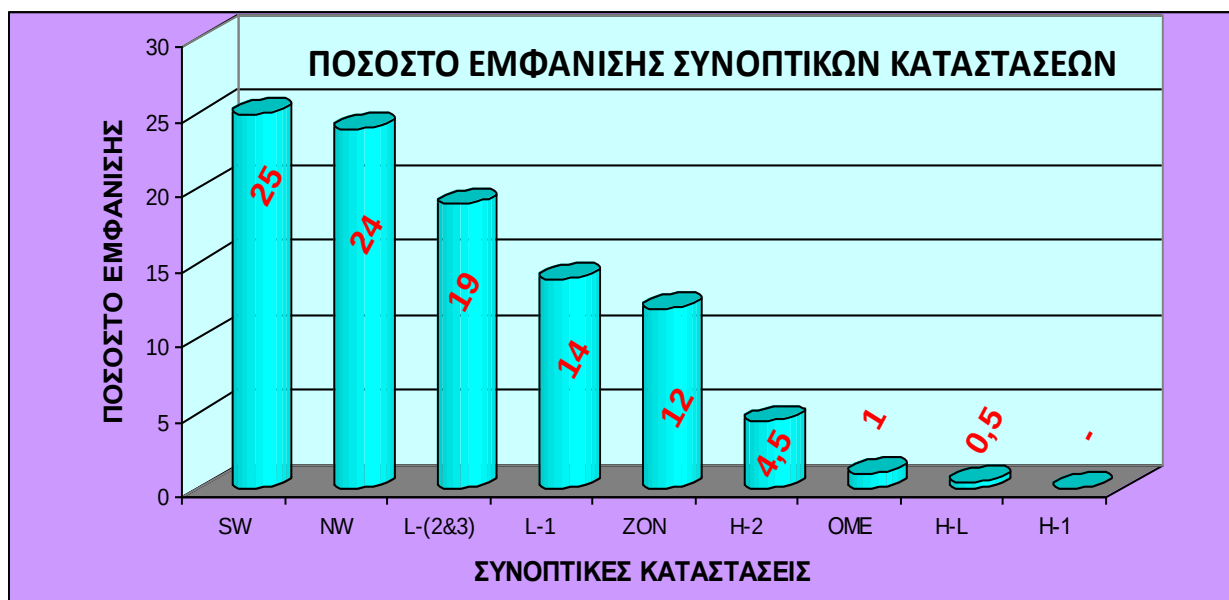
Το σύνολο των ημερών που κατατάχθηκαν στη συνοπτική κατάσταση της ζωνικής κυκλοφορίας (ZON) ήταν 29 από τις 245 ημέρες που ήταν διαθέσιμες ως δεδομένα επεξεργασίας και επαλήθευσης. Αυτό υποδεικνύει ότι το 11,84% των συνολικών ημερών ανήκουν στην κατηγορία της ζωνικής κυκλοφορίας και αποτελεί το μικρότερο ποσοστό ημερών χαλαζόπτωσης από όλες τις συνοπτικές καταστάσεις που εξετάστηκαν.

Οι συνοπτικές καταστάσεις ανοιχτός κυματισμός (H-1), κλειστό υψηλό (H-2), ωμέγα σχηματισμός (OME) και συνδυασμός H-L δεν εξετάστηκαν σε βάθος, λόγω του μικρού αριθμού ημερών που ταξινομήθηκαν σε αυτές τις κατατάξεις. Συνολικά, και οι τέσσερις συνοπτικές καταστάσεις παρουσιάζουν μόνο 15 ημέρες χαλαζόπτωσης (0, 11, 3 και 1, αντίστοιχα) που αντιπροσωπεύει ένα ποσοστό μόλις 6,12%.

Η συχνότητα και το ποσοστό εμφάνισης της κάθε μιας συνοπτικής κατάστασης για το σύνολο των 245 ημερών παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.15 και 5.16, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.15: Αριθμός εμφάνισης των συνοπτικών καταστάσεων για τις 245 ημέρες χαλαζοκαταιγίδων.



Σχήμα 5.16: Ποσοστό εμφάνισης των συνοπτικών καταστάσεων για τις 245 ημέρες χαλαζοκαταιγίδων.

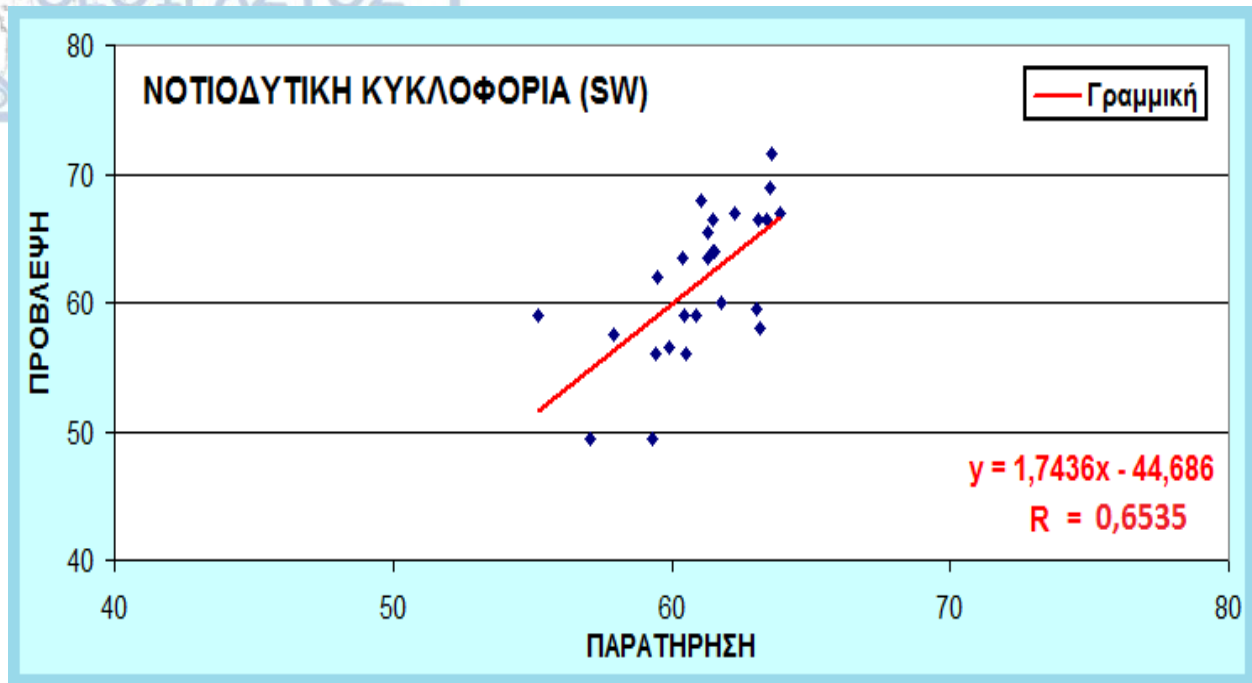
5.4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΣΤΙΣ ΣΥΝΟΠΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

Το μοντέλο – αλγόριθμος (εξίσωση 5.3) πρόβλεψης – εκτίμησης χαλαζοκαταιγίδας που προέκυψε από τη σύνθεση των μη γραμμικών σχέσεων των ανεξαρτήτων μεταβλητών με την εξαρτημένη, εφαρμόστηκε σε κάθε μία από τις παραπάνω έξι (6) συνοπτικές καταστάσεις που συνεισφέρουν περισσότερο στη δημιουργία και ανάπτυξη χαλαζοκαταιγίδων. Στον Πίνακα 5.3 παρατίθενται οι βαθμοί σύνδεσης, δηλαδή οι συσχετίσεις (R) (εκφραζόμενοι σε ποσοστιαία αναλογία), που προήλθαν από την παρατήρηση, δηλαδή τα δεδομένα του ραντάρ, και από την πρόγνωση-πρόβλεψη του αλγορίθμου, για κάθε μια από τις συνοπτικές καταστάσεις, για την εξερευνητική και για τη συνολική περίοδο.

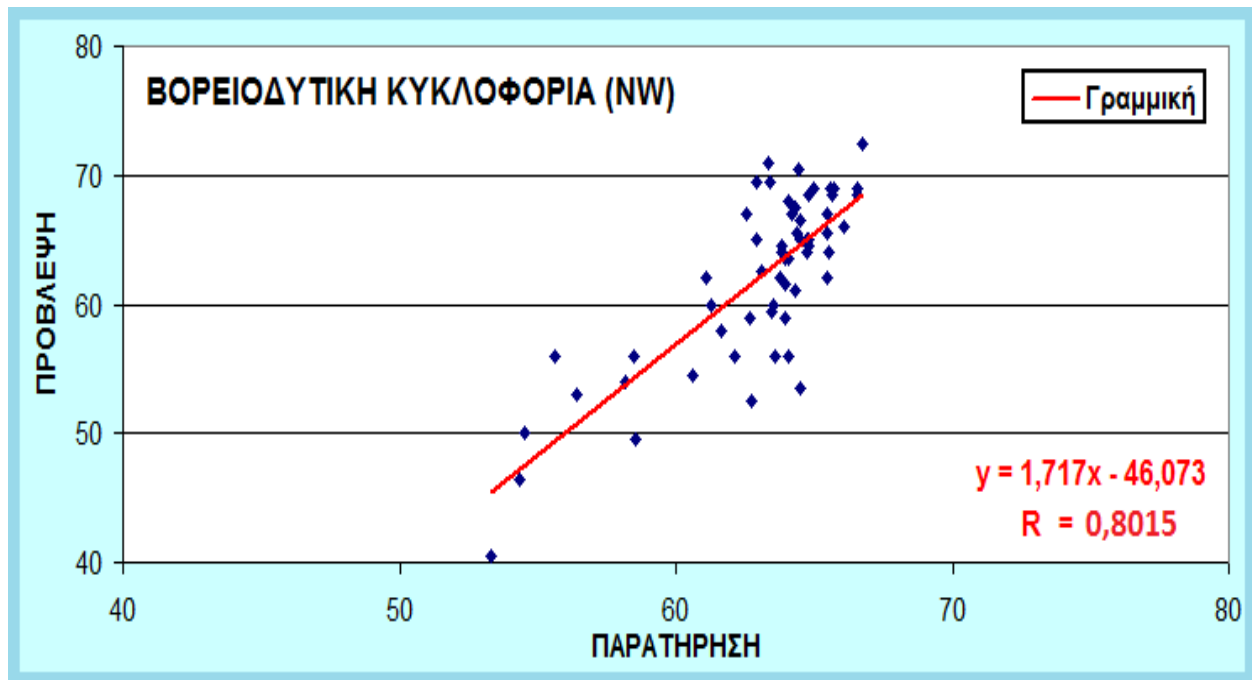
Παρατηρείται ότι τα ποσοστά αξιοπιστίας της πρόγνωσης-πρόβλεψης του αλγορίθμου, για κάθε μια από τις συνοπτικές καταστάσεις κατά την εξερευνητική περίοδο, είναι υψηλότερα από το αρχικό μοντέλο-αλγόριθμος (εξίσωση 5.3) πρόβλεψης-εκτίμησης χαλαζοκαταιγίδας. Το ίδιο ισχύει και για τις περιπτώσεις: βορειοδυτικής κυκλοφορίας (NW), ανοικτού κυματισμού (L-1) και ζωνικής κυκλοφορίας (ZON), για την επιβεβαιωτική περίοδο. Αντίθετα, οι συνοπτικές καταστάσεις: νοτιοδυτική κυκλοφορία (SW), κλειστό χαμηλό και αποκομμένο χαμηλό (L-2 & L-3), καθώς και όλες οι υφειακές καταστάσεις μαζί (L), υπολείπονται κατά λίγο του αρχικού μοντέλου-αλγορίθμου (εξίσωση 5.3) πρόβλεψης-εκτίμησης των χαλαζοκαταιγίδων. Εποπτική εικόνα όλων των παραπάνω απεικονίζεται στα Σχήματα 5.17 έως και 5.22.

Πίνακας 5.3: Ποσοστά συσχέτισης των μέγιστων ανακλαστικότητων μεταξύ παρατήρησης και πρόβλεψης, για κάθε μια από τις συνοπτικές καταστάσεις, κατά την εξερευνητική και την συνολική περίοδο.

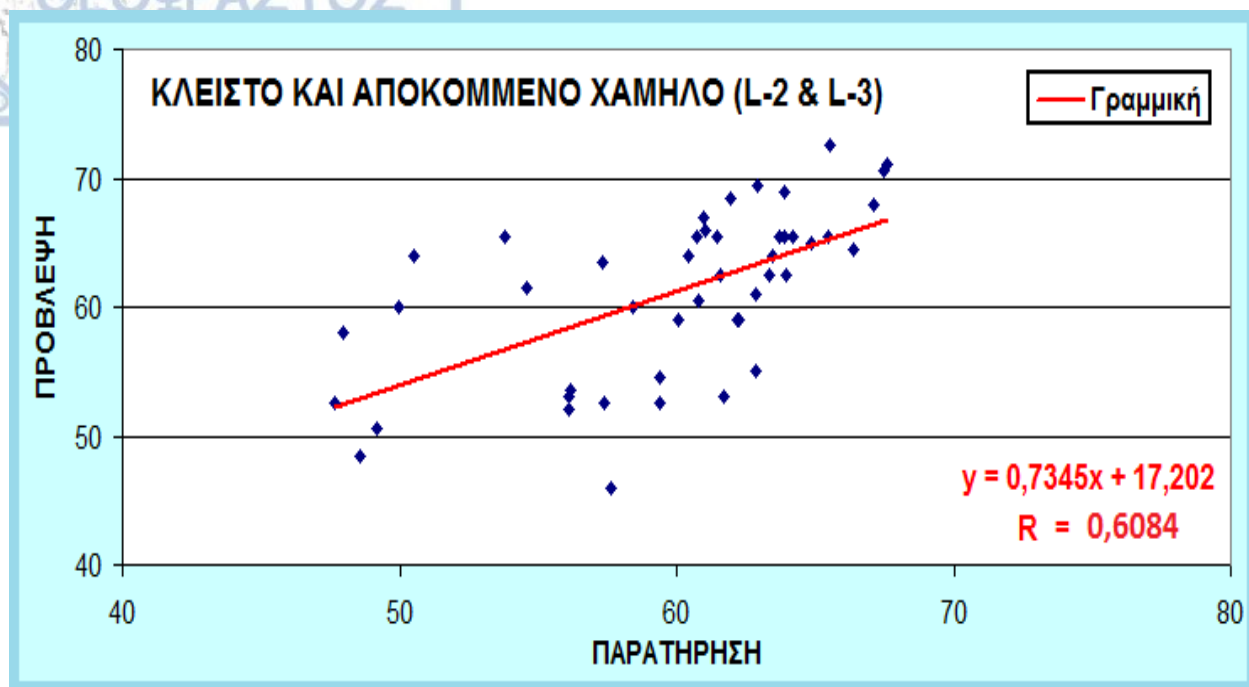
ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	ΕΞΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ
SW	72,95%	65,35%
NW	81,60%	80,15%
L-2 & L-3	73,20%	60,84%
L-1	79,23%	77,47%
L	71,04%	67,42%
ZON	83,47%	77,67%



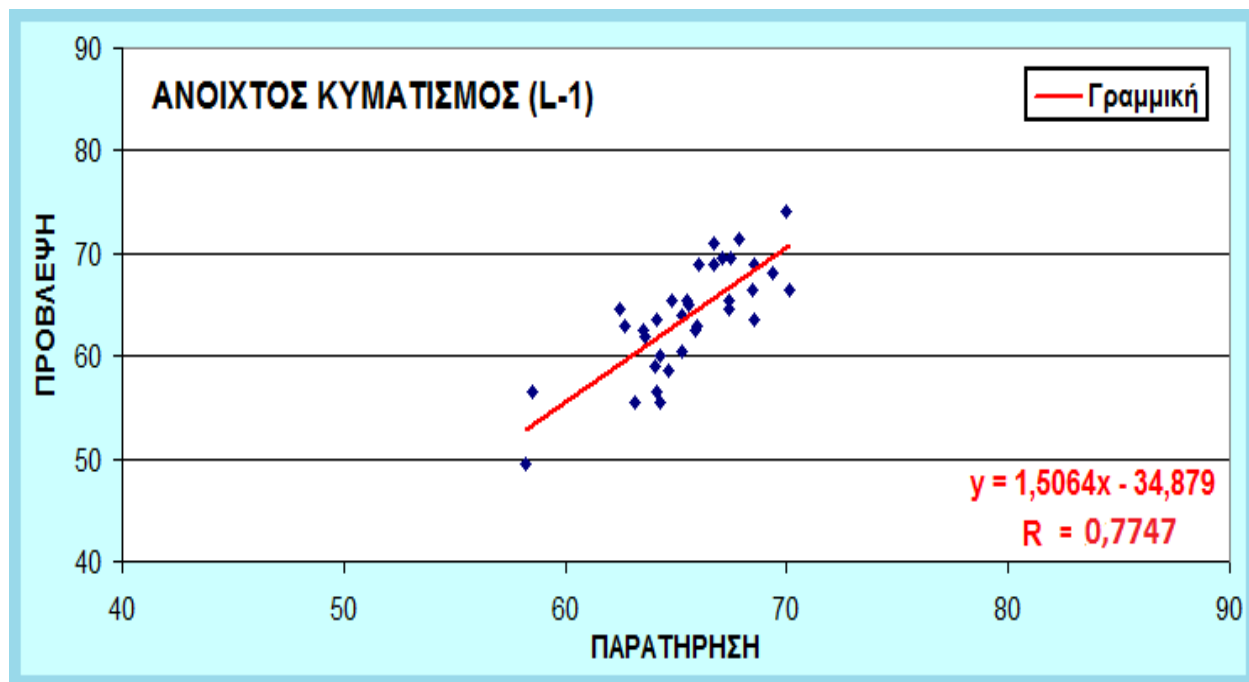
Σχήμα 5.17: Συσχέτιση μέγιστων ανακλαστικότητων (dBZ) μεταξύ παρατήρησης και πρόβλεψης, η οποία προέκυψε από τον αλγόριθμο για τη νοτιοδυτική κυκλοφορία (SW).



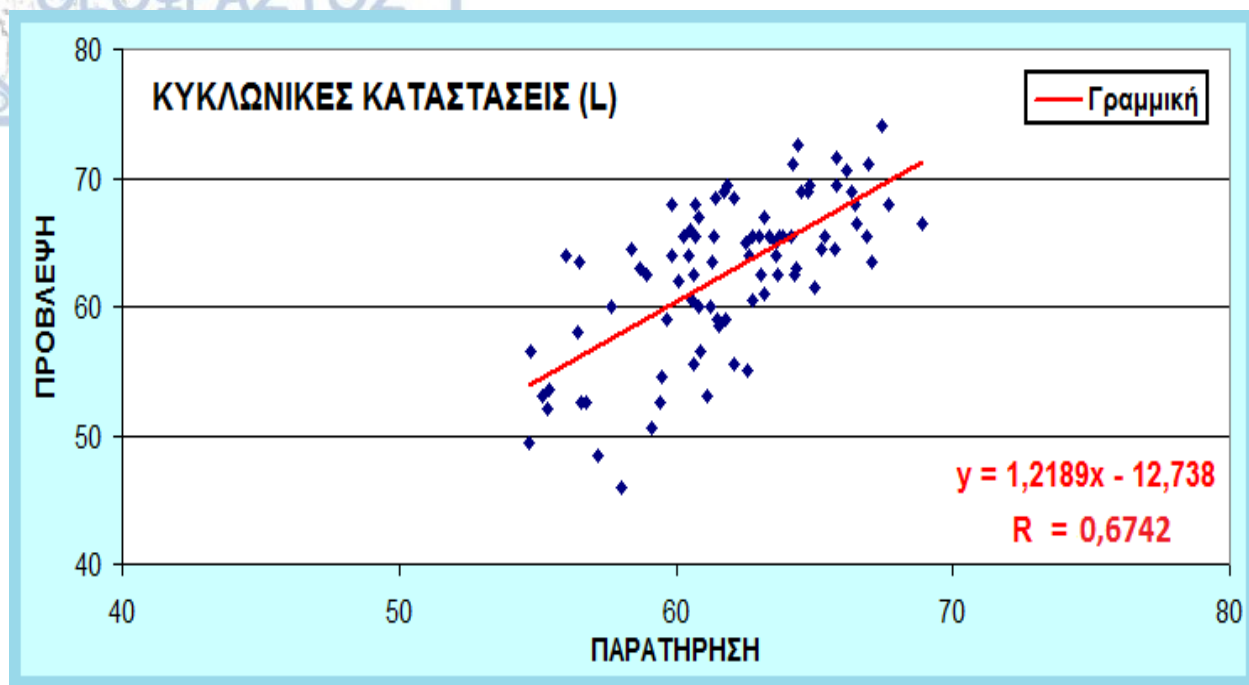
Σχήμα 5.18: Συσχέτιση μέγιστων ανακλαστικότητων (dBZ) μεταξύ παρατήρησης και πρόβλεψης, η οποία προέκυψε από τον αλγόριθμο για τη βορειοδυτική κυκλοφορία (NW).



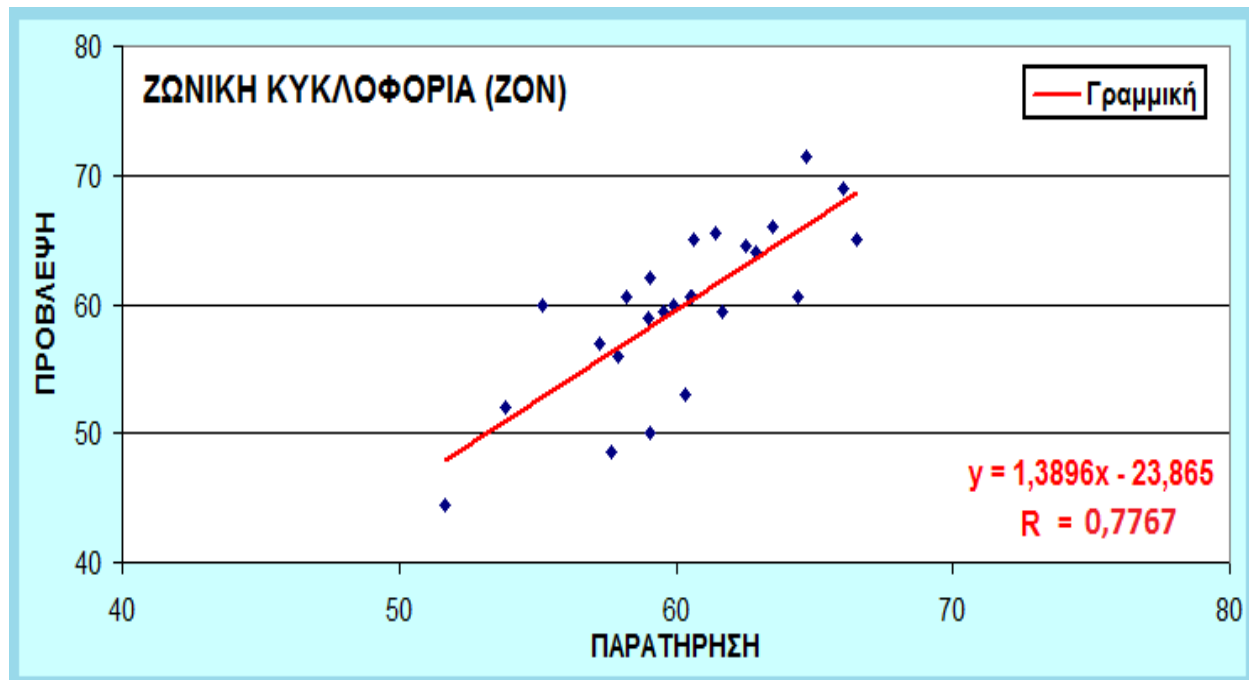
Σχήμα 5.19: Συσχέτιση μέγιστων ανακλαστικότητων (dBZ) μεταξύ παρατήρησης και πρόβλεψης, η οποία προέκυψε από τον αλγόριθμο για το κλειστό και αποκομμένο χαμηλό (L-2 και L-3).



Σχήμα 5.20: Συσχέτιση μέγιστων ανακλαστικότητων (dBZ) μεταξύ παρατήρησης και πρόβλεψης, η οποία προέκυψε από τον αλγόριθμο για τον ανοιχτό κυματισμό (L-1).



Σχήμα 5.21: Συσχέτιση μέγιστων ανακλαστικότητων (dBZ) μεταξύ παρατήρησης και πρόβλεψης, η οποία προέκυψε από τον αλγόριθμο για όλες τις κυκλωνικές συνοπτικές καταστάσεις (L).



Σχήμα 5.22: Συσχέτιση μέγιστων ανακλαστικότητων (dBZ) μεταξύ παρατήρησης και πρόβλεψης, η οποία προέκυψε από τον αλγόριθμο για τη ζωνική κυκλοφορία (ZON).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος μέσω της παρούσης διπλωματικής ήταν η μελέτη των χαρακτηριστικών των χαλαζοκαταιγίδων στην κεντρική Μακεδονία αλλά και η προσπάθεια δημιουργίας ενός μοντέλου - αλγορίθμου για την όσο το δυνατόν βέλτιστη πρόγνωση - πρόβλεψη του φαινομένου. Συνεπώς, για το σκοπό αυτό, μελετήθηκαν συνοπτικοί, δυναμικοί και θερμοδυναμικοί παράγοντες με τους οποίους συνδέονται οι χαλαζοκαταιγίδες άμεσα και πραγματοποιήθηκε επιλογή ορισμένων από αυτούς, με βάση μετεωρολογικά και στατιστικά κριτήρια, για το σχηματισμό του αλγορίθμου. Βασική επιδίωξη είναι ο αλγόριθμος αυτός να είναι εύχρηστος, αντικειμενικός και αποτελεσματικός, έτσι ώστε να συμβάλλει στην έγκυρη και έγκαιρη πρόγνωση χαλαζόπτωσης στην περιοχή ενδιαφέροντος. Η εφαρμογή του μοντέλου - αλγορίθμου αυτού, σε συνδυασμό με μια σειρά άλλων μέσων και μεθόδων, θα συμβάλλει στην αποτελεσματικότερη εφαρμογή μεθόδων προστασίας των καλλιεργειών από το χαλάζι, με άμεση θετική επίδραση στην τοπική και εθνική οικονομία.

Για το σκοπό αυτό θεωρείται μία σειρά ημερών χαλαζόπτωσης κατά τη διάρκεια τη θερμής περιόδου των ετών 2008, 2009 και 2010, από 1^η Απριλίου έως και 30 Σεπτεμβρίου. Τα δεδομένα προέρχονται από ραδιοβολίσεις (12 UTC) του μετεωρολογικού σταθμού του αεροδρομίου "Μακεδονία" της Θεσσαλονίκης. Ο αρχικός συνολικός αριθμός ημερών χαλαζόπτωσης ανέρχεται στις 245. Με τα παραπάνω δεδομένα υπολογίστηκε μια σειρά θερμοϋγρομετρικών και θερμοδυναμικών παραμέτρων. Οι μετεωρολογικές παράμετροι, πρωταρχικές και παράγωγες, διακρίθηκαν σε κατηγορίες ανάλογα με τον παράγοντα δημιουργίας και εκδήλωσης χαλαζοκαταιγίδων που εκφράζουν.

6.1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η μελέτη της κατανομής της μέγιστης ανακλαστικότητας, η οποία επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ως εξαρτημένη μεταβλητή για τη δημιουργία του αλγορίθμου, αποδεικνύει ότι αυτή προσεγγίζει την κανονική κατανομή. Ο μέσος όρος των τιμών της είναι 61,5 dBz, η διάμεσος 62,5 dBz, ενώ το εύρος κυμαίνεται από 40,5 έως και 74,0 dBz. Το 50% των παρατηρήσεων βρίσκεται μεταξύ 57,5 και 66 dBz, που εμπεριέχει τη μέση τιμή και τη διάμεσο, ενώ η μικρή αρνητική τιμή του συντελεστή λοξότητας υποδηλώνει την υπεροχή των μεγάλων τιμών ανακλαστικότητας, όπως ακριβώς αναμενόταν, λόγω της μελέτης των μέγιστων τιμών της εξεταζόμενης παραμέτρου.
- Από τη μελέτη των ανεξάρτητων μεταβλητών, παρατηρήθηκε ότι οι δείκτες αστάθειας που υπολογίστηκαν με βάση την πραγματική θερμοκρασία και την αντίστοιχη θερμοκρασία (virtual temperature), παρουσίασαν σχεδόν απόλυτη συσχέτιση ($\sim 1,00$). Αυτό οδήγησε στην απόρριψη όσων δεικτών αστάθειας προέκυψαν επιπρόσθετα με τη χρήση της αντίστοιχης θερμοκρασίας. Επομένως, δείκτες όπως, LIFV, CAPV, BRCV, κ.ά., εξαιρέθηκαν από την περαιτέρω επεξεργασία.
- Από τις επιμέρους συσχετίσεις με την παράμετρο της μέγιστης ανακλαστικότητας, αποδείχθηκε ότι οι παράμετροι που εμφανίστηκαν να την αποδίδουν αποτελεσματικότερα ήταν κατά σειρά οι παρακάτω: αναλογία μίγματος στην επιφάνεια (MRSUR), υετίσιμο ύδωρ (PWAT), δυνητική θερμοκρασία στο μέσο στρώμα ανάμιξης (MLTH), δείκτης Showalter (SHOW), δείκτης lifted (LIFT), δείκτης K (KINX), ύψος της ισοθέρμου των -5°C (H_{-5}) και σχετική υγρασία στην επιφάνεια (RHSUR).
- Για τη δημιουργία του μοντέλου - αλγορίθμου υιοθετήθηκε η μεθοδολογία της πολλαπλής συσχέτισης, με συντελεστές βαρύτητας τους επιμέρους συντελεστές συσχέτισης προς το άθροισμα των συντελεστών συσχέτισης όλων των ανεξαρτήτων μεταβλητών. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι γραμμικές συναρτήσεις που προέκυψαν από τη γραμμική συσχέτιση μεταξύ των ανεξαρτήτων μεταβλητών και της εξαρτημένης μεταβλητής. Με στόχο τη βέλτιστη απόδοση, χρησιμοποιήθηκαν οι συναρτήσεις που προέκυψαν από τις γραμμικές και μη γραμμικές συσχετίσεις μεταξύ των ανεξαρτήτων μεταβλητών και της εξαρτημένης μεταβλητής.

6.1.2 ΕΙΔΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Το γραμμικό μοντέλο - αλγόριθμος που δημιουργήθηκε βασισμένο στις προαναφερθείσες παραμέτρους και μεθοδολογία βασισμένη αποκλειστικά στη γραμμική συσχέτιση μεταξύ των

ανεξαρτήτων μεταβλητών και της εξαρτημένης μεταβλητής, εφαρμόστηκε στα δεδομένα της "εξερευνητικής" περιόδου αποδίδοντας βαθμό σύνδεσης, δηλαδή συσχέτισης (R), μεταξύ των προγνωστικών και των δεδομένων της παρατήρησης της μέγιστης ανακλαστικότητας, εκφραζόμενο σε ποσοστιαία αναλογία, 59,22%. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα το γραμμικό αυτό μοντέλο – αλγόριθμος να μην κριθεί αρκετά ικανοποιητικό.

- Το μη γραμμικό μοντέλο – αλγόριθμος, που δημιουργήθηκε βασισμένο στις προαναφερθείσες παραμέτρους και στις συναρτήσεις που προέκυψαν από τη γραμμική και τις μη γραμμικές συσχετίσεις μεταξύ των ανεξαρτήτων μεταβλητών και της εξαρτημένης μεταβλητής, εφαρμόστηκε στα δεδομένα της "εξερευνητικής" περιόδου αποδίδοντας βαθμό σύνδεσης, δηλαδή συσχέτισης (R), μεταξύ των προγνωστικών και των δεδομένων της παρατήρησης της μέγιστης ανακλαστικότητας, εκφραζόμενο σε ποσοστιαία αναλογία, 76,61%. Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα δεδομένα, «εξερευνητική» και «επιβεβαιωτική» περίοδο, ο βαθμός σύνδεσης, εκφραζόμενος σε ποσοστιαία αναλογία, ήταν 69,76%.
- Κατά τον έλεγχο ευαισθησίας του μοντέλου – αλγορίθμου ως προς το βέλτιστο αριθμό ανεξαρτήτων παραμέτρων που τον συνθέτουν, δημιουργήθηκε και υπολογίστηκε ο αλγόριθμος και με 5, 6, 7 και 9 παραμέτρους (ως ένατη παράμετρο προστέθηκε ο δείκτης CAPE). Σε κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις το ποσοστό συσχέτισης πραγματικών με προγνωστικών αποτελεσμάτων ήταν μικρότερο από αυτό που προήλθε από τη χρήση των οκτώ (8) ανεξαρτήτων παραμέτρων.
- Με απώτερο σκοπό την έμμεση εισαγωγή συνοπτικών χαρακτηριστικών στο μοντέλο – αλγόριθμο, προσθέτοντας επικουρικά προγνωστικό χρόνο, μελετήθηκαν οι συνοπτικές καταστάσεις όλων των ημερών χαλαζόπτωσης. Αποδείχθηκε ότι οι συχνότερα εμφανιζόμενες συνοπτικές καταστάσεις, κατά φθίνουσα σειρά, είναι οι κυκλωνικές καταστάσεις (L = 32,65%), η νοτιοδυτική κυκλοφορία (SW = 25,31%), η βορειοδυτική κυκλοφορία (NW = 24,08%) και τελευταία η ζωνική κυκλοφορία (ZON = 11,84%). Το ποσοστό των κυκλωνικών καταστάσεων (L) συμπεριλαμβάνει τους ανοικτούς κυματισμούς (L-1) με ποσοστό 13,88% και το κλειστό χαμηλό και αποκομμένο χαμηλό μαζί (L-2 και L-3) με ποσοστό 18,77%.
- Το μη γραμμικό μοντέλο – αλγόριθμος, εφαρμόστηκε στα αντίστοιχα δεδομένα σε κάθε μια από τις παραπάνω συνοπτικές καταστάσεις με σκοπό τον έλεγχο της εγκυρότητάς του σύμφωνα με τις παραμέτρους που επιλέχθηκαν. Παρατηρείται ότι τα ποσοστά αξιοπιστίας της πρόγνωσης-πρόβλεψης του αλγορίθμου, για κάθε μια από τις συνοπτικές καταστάσεις κατά την εξερευνητική

περίοδο, είναι υψηλότερα από το αρχικό μη γραμμικό μοντέλο–αλγόριθμο πρόβλεψης–εκτίμησης χαλαζοκαταιγίδας. Το ίδιο ισχύει και για τις περιπτώσεις: βορειοδυτικής κυκλοφορίας (NW), ανοικτού κυματισμού (L-1) και ζωνικής κυκλοφορίας (ZON), για τη συνολική περίοδο. Αντίθετα, οι συνοπτικές καταστάσεις: νοτιοδυτική κυκλοφορία (SW), κλειστό χαμηλό και αποκομμένο χαμηλό μαζί (L-2 & L-3), καθώς και όλες οι υφειακές καταστάσεις μαζί (L), υπολείπονται λιγάκι του αρχικού μη γραμμικού μοντέλου–αλγορίθμου πρόβλεψης–εκτίμησης των χαλαζοκαταιγίδων.

6.1.3 ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Από μετεωρολογική και στατιστική άποψη, μία και μόνο παράμετρος δε μπορεί να δώσει ικανοποιητική πρόγνωση–πρόβλεψη χαλαζοκαταιγίδων στην περιοχή μελέτης, γιατί δεν είναι ικανή να περιγράψει ένα τέτοιο πολύπλοκο φαινόμενο. Γι' αυτό ακριβώς, στο σχηματισμό του αλγορίθμου πρόγνωσης χαλαζοκαταιγίδων στην κεντρική Μακεδονία, λαμβάνεται υπόψη μια σειρά μετεωρολογικών παραμέτρων που εκφράζουν διάφορους παράγοντες, οι οποίοι συμβάλλουν στην ανάπτυξη χαλαζοκαταιγίδων, καθώς και όλα τα επίπεδα της κατώτερης ατμόσφαιρας που την επηρεάζουν.
- Οι γραμμικές, και κυρίως οι μη γραμμικές συσχετίσεις φαίνεται να είναι οι συναρτήσεις που περιγράφουν τη σχέση μεταξύ χαλαζοκαταιγίδων και μετεωρολογικών παραμέτρων. Τα στατιστικά κριτήρια, όμως, δεν είναι τα πλέον καθοριστικά για την επιλογή των μεταβλητών που υπεισέρχονται στο μοντέλο. Πρώτα πρέπει να γίνεται η επιλογή των μεταβλητών με μετεωρολογικά κριτήρια: με βάση τη φυσική τους σχέση ως προς το φαινόμενο της χαλαζοκαταιγίδας, ως προς την ανεξάρτητη μεταβλητή, αλλά και ως προς τη μεταξύ ανεξάρτητων μεταβλητών σχέση. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια, τόσο με τη μεθοδολογία της μη γραμμικής πολλαπλής συσχέτισης, όσο και της μεθόδου προσδιορισμού των συντελεστών βαρύτητας από τους επιμέρους συντελεστές συσχέτισης προς το άθροισμα των συντελεστών συσχέτισης όλων των ανεξάρτητων μεταβλητών, επιλέγονται οι τελικές μεταβλητές, έτσι ώστε να δίνουν στατιστικά αποδεκτά αποτελέσματα, παραμένοντας στον αλγόριθμο μόνο όσες συνεισφέρουν πραγματικά σ' αυτόν.
- Αξίζει να σημειωθεί πως, από ένα σημείο και πέρα, η προσθήκη ανεξάρτητων μεταβλητών, οι οποίες, γενικά, δεν παρουσιάζουν μεγάλους συντελεστές συσχέτισης, δε συνεισφέρει στην προγνωστική σχέση, όπως υποστηρίζει και ο Zak (1977).

- Οι ραδιοβολίσσεις της 12 UTC και οι μεταβλητές που προκύπτουν από αυτές αποτελούν χρήσιμα και ικανοποιητικά εργαλεία για την πρόβλεψη χαλαζοκαταιγίδων στην περιοχή μελέτης. Ιδιαίτερα αντιπροσωπευτικές φαίνεται να είναι για τις θερμικές χαλαζοκαταιγίδες, αφού άλλωστε αφορούν κατά κύριο λόγο θερμοϋγρομετρικά χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας.
- Η αντικατάσταση ορισμένων παραμέτρων, κυρίως αστάθειας, από άλλες σχετικά της ίδιας σημασίας και παραπλήσιας συσχέτισης δεν οδηγεί σε σημαντικές μεταβολές. Αυτό είναι ενδεικτικό της ευστάθειας του προτεινόμενου μοντέλου-αλγορίθμου. Η ευστάθεια αυτή οφείλεται, κατά κύριο λόγο, στο γεγονός ότι αυτές οι παράμετροι αφορούν στα ανώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα και λιγότερο στην επιφάνεια.
- Τα αποτελέσματα, αλλά και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη αυτή, μπορούν να θεωρηθούν σχετικά αξιόπιστα, καθώς είναι συναφή με κοινώς αποδεκτές θεωρίες και μελέτες της εθνικής και διεθνούς βιβλιογραφίας. Επίσης, αυτά συμβαδίζουν με αντίστοιχα συμπεράσματα που γενικώς αφορούν στην περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας, καθώς και του φαινομένου των χαλαζοκαταιγίδων. Κάποιες προγενέστερες μελέτες, όπως των: Τουρναβίτη (1999), Γιαννούλη (2000), Στολάκη (2004), Δημούτση (2005) και Σφυρή (2012), που διαπραγματεύονται ανάλογο και αντίστοιχο περιεχόμενο, δεν διαφέρουν, αλλά επιπρόσθετα συνάδουν με τα συμπεράσματα της παρούσης διατριβής ειδίκευσης.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικειμενικός σκοπός στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η μελέτη του φαινομένου των χαλαζοκαταιγίδων και η δημιουργία ενός μοντέλου-αλγορίθμου με στόχο την πρόγνωση αυτών στην περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας.

Για αυτό το σκοπό επιλέγεται ένα σύνολο ημερών χαλαζόπτωσης, το οποίο παρουσιάζει αστάθεια, κατά τις περιόδους Απριλίου-Σεπτεμβρίου των ετών 2008 – 2010. Τα δεδομένα προέρχονται από ραδιοβολίσεις (12 UTC) του μετεωρολογικού σταθμού του αεροδρομίου "Μακεδονία" της Θεσσαλονίκης. Σε αυτά προστίθενται και τα δεδομένα του μετεωρολογικού ραντάρ, καθώς και των χαρτών καιρού. Από το σύνολο των ημερών που προέκυψαν εξαιρέθηκε το 20% με σκοπό την αξιολόγηση του μοντέλου-αλγορίθμου που θα δημιουργηθεί. Με όλα τα παραπάνω δεδομένα υπολογίζεται μια σειρά μετεωρολογικών παραμέτρων, ενδεικτικών για την παρουσία και ανάπτυξη χαλαζοκαταιγίδων, όπως είναι οι δείκτες αστάθειας. Οι μετεωρολογικές παράμετροι, οι οποίες προήλθαν είτε άμεσα είτε από την επεξεργασία των αρχικών δεδομένων, αξιολογούνται ως προς τη σχέση τους με το φαινόμενο τόσο από μετεωρολογικής πλευράς όσο και από στατιστικής.

Η μεθοδολογία για τη δημιουργία του μοντέλου-αλγορίθμου απαιτεί τη χρήση γραμμικών και μη γραμμικών εξισώσεων, οι οποίες επιλέγεται να έχουν όλες ως εξαρτημένη μεταβλητή τη μέγιστη ανακλαστικότητα της εκάστοτε ημέρας μελέτης. Η επιλογή των ανεξάρτητων μεταβλητών πραγματοποιήθηκε με μετεωρολογικά και στατιστικά κριτήρια, ώστε να αποδίδουν με το βέλτιστο τρόπο τα χαρακτηριστικά και τις συνθήκες δημιουργίας χαλαζοκαταιγίδων. Επομένως, όσες μετεωρολογικές παράμετροι χρησιμοποιούνται σε αυτό πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες προϋποθέσεις και να συνάδουν με την ύπαρξη αστάθειας, διαθέσιμης υγρασίας, δυναμικών αιτίων και μικροφυσικών διεργασιών που επιτρέπουν και ευνοούν την εκδήλωση του φαινομένου.

Επιπλέον, η μεθοδολογία στην οποία βασίστηκε η δημιουργία του μοντέλου-αλγορίθμου περιείχε τη χρήση συσχετίσεων για την επιλογή των μεταβλητών και τη χρήση του μοντέλου πολλαπλής παλινδρόμησης για τη διαμόρφωση της τελικής προγνωστικής εξίσωσης. Αυτό επιτρέπει την εισαγωγή στην εξίσωση μόνο των μετεωρολογικών παραμέτρων που συνεισφέρουν βέλτιστα σ' αυτή. Συγκεκριμένα, οι μετεωρολογικές παράμετροι που επιλέχθηκαν να συμμετέχουν είναι οι δείκτες αστάθειας SHOW, LIFT και KINX, καθώς και οι τιμές αναλογίας μίγματος στην επιφάνεια (MRSUR), σχετικής υγρασίας στην επιφάνεια (RHSUR), δυνητικής θερμοκρασίας στο μέσο στρώμα ανάμιξης (MLTH), υετίσιμου νερού (PWAT) και το ύψος της ισόθερμου των -5°C (H_{-5}).

Η πολλαπλή παλινδρόμηση εφαρμόζεται για τη δημιουργία αρχικά ενός μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης και επαναλαμβάνεται για τη δημιουργία ενός δεύτερου μοντέλου μη γραμμικής παλινδρόμησης. Και στις δυο περιπτώσεις πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις παρατηρήσεις του ραντάρ, τόσο με τα δεδομένα των ημερών μελέτης, όσο και με το σύνολο των αρχικών δεδομένων. Από τη στατιστική αξιολόγηση των προγνωστικών αλγορίθμων προκύπτει, ότι ο αλγόριθμος που σχηματίστηκε με τη χρήση μη γραμμικών εξισώσεων αποδίδει καλύτερα από αυτό των γραμμικών.

Το μη γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης ελέγχθηκε και ως προς την ευαισθησία του, με σκοπό να επικυρωθεί η ορθή χρήση των 8 προαναφερθέντων παραμέτρων. Η χρήση των πρώτων 5, 6 και 7 ανεξάρτητων μεταβλητών, σύμφωνα με την κατάταξη των συντελεστών συσχέτισής τους με τη μέγιστη ανακλαστικότητα, αποδείχθηκε λιγότερο ικανοποιητική από αυτή των 8. Ωστόσο, ελέγχθηκε και η συμπεριφορά του αλγορίθμου με την πρόσθεση του δείκτη CAPE ως ένατη ανεξάρτητη μεταβλητή, με την απόδοσή του και σε αυτή την περίπτωση να ελαττώνεται.

Στη συνέχεια, το σύνολο των ημερών ταξινομήθηκε σε κατηγορίες σύμφωνα με τη συνοπτική κατάσταση της εκάστοτε ημέρας. Αφού πραγματοποιήθηκε η μελέτη της συχνότητας εμφάνισής τους, το μοντέλο-αλγόριθμος εφαρμόστηκε ξεχωριστά για τις 6 πρώτες σε συχνότητα επιμέρους συνοπτικές καταστάσεις, με σκοπό και πάλι τον έλεγχο της συμπεριφοράς και απόδοσής του. Τα ποσοστά αξιοπιστίας υπήρξαν αποδεκτά και για ορισμένες καταστάσεις μεγαλύτερα από αυτό του αλγορίθμου που εφαρμόστηκε στο σύνολο των συνοπτικών καταστάσεων.



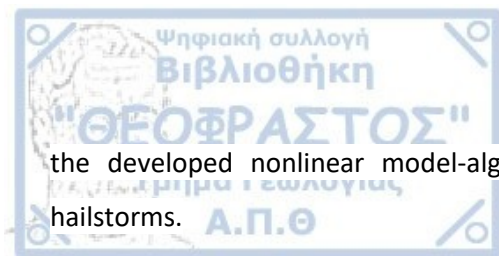
The objective on this work is to study the phenomenon of hailstorms and to create a model-algorithm in order to predict-forecast them in the area of Central Macedonia.

For this purpose, a number of days were chosen, which are characterized by instability, for the time period from April to September for the years 2008, 2009 and 2010. The data used were obtained from atmospheric soundings (12UTC), being launched at the synoptic station of Thessaloniki's airport "Macedonia". Additional data, from a C-band weather radar and weather charts, were used. A 20% of the original data were excluded from the development of the model-algorithm, so that they could be used to the model-algorithm's evaluation (confirmatory period). By using those data, meteorological parameters and indices were calculated. They were evaluated according to their relationship with the phenomenon through meteorological and statistical criteria.

The adopted methodology requires the use of both linear and nonlinear equations, which have as the dependent variable the maximum daily reflectivity of the radar. The independent variables were chosen through meteorological criteria, so that they are representative of the associate weather conditions. As a result, the independent variables are related to specific conditions of instability, humidity, dynamical and thermodynamical characteristics of hailstorms.

Furthermore, the methodology of developing the model-algorithm relied upon the linear and nonlinear multiple regression analysis. Correlation values were used for the determination of the weighted coefficients. This allows the input of only the meteorological parameters that explain the weather conditions the best. The adopted parameters were: Showalter index (SHOW), Lifted index (LIFT), K index (KINX), mixing ratio at the surface (MRSUR), relative humidity at the surface (RHSUR), potential temperature of the mean mixing layer (MLTH), precipitable water (PWAT) and height of -5°C isothermal.

Multiple regression analyses were initially used for the development of a linear model-algorithm and then for the development of a nonlinear model-algorithm. In both cases the results were compared to those of the radar measurements for the exploratory period. The nonlinear model-algorithm was more efficient than the linear one. Meanwhile, the results of the nonlinear model-algorithm were compared to those of the radar for the confirmatory period and for the whole time period, proving that



the developed nonlinear model-algorithm is a reliable and useful tool for predicting-forecasting hailstorms.

The nonlinear model-algorithm was also developed by using 5, 6, 7 and 9 independent variables in order to evaluate the model-algorithm stability. The index CAPE was used as the 9th parameter. In all cases, the most efficient model-algorithm was the one consisted of 8 independent parameters.

Finally, each hail day was classified into the upper air synoptic conditions. First, their frequency of occurrence was estimated and presented and then the model-algorithm was applied to the 6 more common synoptic situations. The model-algorithm was proven to be reliable for all synoptic situations. Actually, in some of them showed even better results from the initial.



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακας 1: Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των 26 παραμέτρων που εξετάστηκαν.

	SHOW	LIFT	LFTV	SWEAT	KINX	CTOT	VTOT	TOTL	CAPE	CAPV	BRCH	BRCV	LCLT	LCLP	MLMR	MLTH	THTK	PWAT	TSUR	T _{asur}	RHSUR	MRSUR	H ₀	H _{ao}	H _s	H _a
SHOW	1,00	0,35	0,35	-0,69	-0,61	-0,62	-0,41	-0,81	-0,34	-0,35	-0,12	-0,12	-0,24	0,07	-0,44	-0,48	-0,44	-0,58	-0,38	-0,48	-0,08	-0,49	0,38	0,51	0,33	0,31
LIFT	0,35	1,00	1,00	-0,10	-0,22	-0,09	-0,49	-0,40	-0,53	-0,55	-0,16	-0,16	-0,83	-0,62	-0,63	-0,27	-0,08	-0,18	-0,35	-0,26	0,11	-0,29	0,01	0,01	-0,05	-0,05
LFTV	0,35	1,00	1,00	-0,11	-0,22	-0,08	-0,48	-0,40	-0,54	-0,56	-0,16	-0,16	-0,84	-0,62	-0,64	-0,29	-0,10	-0,19	-0,37	-0,28	0,11	-0,30	0,03	0,02	-0,03	-0,03
SWEAT	-0,69	-0,10	-0,11	1,00	0,42	0,41	0,02	0,37	0,19	0,20	0,04	0,04	0,21	-0,07	0,43	0,43	0,50	0,62	0,32	0,46	0,12	0,46	-0,48	-0,55	-0,42	-0,45
KINX	-0,61	-0,22	-0,22	0,42	1,00	0,51	0,07	0,48	0,17	0,18	0,11	0,11	0,23	0,10	0,35	0,20	0,20	0,63	0,14	0,33	0,20	0,34	-0,13	-0,60	-0,16	-0,20
CTOT	-0,62	-0,09	-0,08	0,41	0,51	1,00	-0,16	0,74	-0,01	-0,00	-0,00	-0,00	0,00	0,19	-0,01	-0,28	-0,29	0,22	-0,22	-0,03	0,23	-0,02	0,26	-0,26	0,20	0,24
VTOT	-0,41	-0,49	-0,48	0,02	0,07	-0,16	1,00	0,54	0,36	0,35	0,08	0,08	0,11	-0,15	0,10	0,40	0,20	-0,11	0,36	0,12	-0,29	0,13	-0,08	0,17	-0,01	0,08
TOTL	-0,81	-0,40	-0,40	0,37	0,48	0,74	0,54	1,00	0,24	0,24	0,05	0,05	0,08	0,06	0,07	0,04	-0,11	0,12	0,06	0,06	0,00	0,07	0,17	-0,10	0,17	0,26
CAPE	-0,34	-0,53	-0,54	0,19	0,17	-0,01	0,36	0,24	1,00	1,00	0,30	0,29	0,46	0,23	0,58	0,33	0,29	0,33	0,32	0,35	-0,00	0,40	-0,24	-0,13	-0,16	-0,18
CAPV	-0,35	-0,55	-0,56	0,20	0,18	-0,00	0,35	0,24	1,00	1,00	0,30	0,29	0,48	0,25	0,62	0,35	0,30	0,35	0,33	0,37	0,00	0,42	-0,25	-0,14	-0,18	-0,20
BRCH	-0,12	-0,16	-0,16	0,04	0,11	-0,00	0,08	0,05	0,30	0,30	1,00	1,00	0,18	0,09	0,24	0,13	0,13	0,17	-0,04	0,05	0,10	0,09	-0,12	-0,11	-0,10	-0,11
BRCV	-0,12	-0,16	-0,16	0,04	0,11	-0,00	0,08	0,05	0,29	0,29	1,00	1,00	0,18	0,09	0,24	0,13	0,14	0,17	-0,04	0,05	0,10	0,09	-0,13	-0,11	-0,11	-0,12
LCLT	-0,24	-0,83	-0,84	0,21	0,23	0,00	0,11	0,08	0,46	0,48	0,18	0,18	1,00	0,79	0,86	0,27	0,29	0,45	0,27	0,44	0,16	0,46	-0,26	-0,26	-0,21	-0,27
LCLP	0,07	-0,62	-0,62	-0,07	0,10	0,19	-0,15	0,06	0,23	0,25	0,09	0,09	0,79	1,00	0,50	-0,38	-0,28	0,11	-0,29	0,03	0,37	0,05	0,26	0,05	0,24	0,21
MLMR	-0,44	-0,63	-0,64	0,43	0,35	-0,01	0,10	0,07	0,58	0,62	0,24	0,24	0,86	0,50	1,00	0,53	0,63	0,74	0,42	0,72	0,28	0,74	-0,59	-0,52	-0,52	-0,60
MLTH	-0,48	-0,27	-0,29	0,43	0,20	-0,28	0,40	0,04	0,33	0,35	0,13	0,13	0,27	-0,38	0,53	1,00	0,90	0,52	0,86	0,63	-0,31	0,63	-0,81	-0,48	-0,70	-0,75
THTK	-0,44	-0,08	-0,10	0,50	0,20	-0,29	0,20	-0,11	0,29	0,30	0,13	0,14	0,29	-0,28	0,63	0,90	1,00	0,68	0,68	0,72	-0,02	0,72	-0,95	-0,62	-0,85	-0,93
PWAT	-0,58	-0,18	-0,19	0,62	0,63	0,22	-0,11	0,12	0,33	0,35	0,17	0,17	0,45	0,11	0,74	0,52	0,68	1,00	0,37	0,72	0,34	0,72	-0,64	-0,83	-0,61	-0,71
TSUR	-0,38	-0,35	-0,37	0,32	0,14	-0,22	0,36	0,06	0,32	0,33	-0,04	-0,04	0,27	-0,29	0,42	0,86	0,68	0,37	1,00	0,57	-0,51	0,56	-0,59	-0,33	-0,51	-0,55
T _{asur}	-0,48	-0,26	-0,28	0,46	0,33	-0,03	0,12	0,06	0,35	0,37	0,05	0,05	0,44	0,03	0,72	0,63	0,72	0,72	0,57	1,00	0,39	0,99	-0,68	-0,60	-0,63	-0,70
RHSUR	-0,08	0,11	0,11	0,12	0,20	0,23	-0,29	0,00	-0,00	0,00	0,10	0,10	0,16	0,37	0,28	-0,31	-0,02	0,34	-0,51	0,39	1,00	0,40	-0,03	-0,26	-0,08	-0,10
MRSUR	-0,49	-0,29	-0,30	0,46	0,34	-0,02	0,13	0,07	0,40	0,42	0,09	0,09	0,46	0,05	0,74	0,63	0,72	0,72	0,56	0,99	0,40	1,00	-0,67	-0,58	-0,62	-0,68
H ₀	0,38	0,01	0,03	-0,48	-0,13	0,26	-0,08	0,17	-0,24	-0,25	-0,12	-0,13	-0,26	0,26	-0,59	-0,81	-0,95	-0,64	-0,59	-0,68	-0,03	-0,67	1,00	0,60	0,84	0,92
H _{ao}	0,51	0,01	0,02	-0,55	-0,60	-0,26	0,17	-0,10	-0,13	-0,14	-0,11	-0,11	-0,26	0,05	-0,52	-0,48	-0,62	-0,83	-0,33	-0,60	-0,26	-0,58	0,60	1,00	0,57	0,67
H _s	0,33	-0,05	-0,03	-0,42	-0,16	0,20	-0,01	0,17	-0,16	-0,18	-0,10	-0,11	-0,21	0,24	-0,52	-0,70	-0,85	-0,61	-0,51	-0,63	-0,08	-0,62	0,84	0,57	1,00	0,86
H _a	0,31	-0,05	-0,03	-0,45	-0,20	0,24	0,08	0,26	-0,18	-0,20	-0,11	-0,12	-0,27	0,21	-0,60	-0,75	-0,93	-0,71	-0,55	-0,70	-0,10	-0,68	0,92	0,67	0,86	1,00

Πίνακας 2: Έλεγχος στατιστικής σημαντικότητας των συντελεστών συσχέτισης των 8 ανεξάρτητων μεταβλητών ως προς την ανεξάρτητη.

MRSUR

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.605 ^a	.367	.363	5,16286

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1 Regression	3084.637	1	3084.637	115.724	.000 ^b
Residual	5331.026	200	26.655		
Total	8415.663	201			

PWAT

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.562 ^a	.316	.312	5,36524

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1 Regression	2658.507	1	2658.507	92.355	.000 ^b
Residual	5757.156	200	28.786		
Total	8415.663	201			

MLTH

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.449 ^a	.202	.198	5,79526

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1 Regression	1698.656	1	1698.656	50.578	.000 ^b
Residual	6717.008	200	33.585		
Total	8415.663	201			

SHOW

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.479 ^a	.229	.225	5,69533

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1 Regression	1928.305	1	1928.305	59.448	.000 ^b
Residual	6487.359	200	32.437		
Total	8415.663	201			

H-5

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.383 ^a	.146	.142	5,99340

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1 Regression	1231.495	1	1231.495	34.284	.000 ^b
Residual	7184.169	200	35.921		
Total	8415.663	201			

LIFT

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.149 ^a	.022	.017	6,41476

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1 Regression	185.828	1	185.828	4.516	.035 ^b
Residual	8229.835	200	41.149		
Total	8415.663	201			

KINX

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.337 ^a	.113	.109	6,10839

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1 Regression	953.167	1	953.167	25.546	.000 ^b
Residual	7462.496	200	37.312		
Total	8415.663	201			

RHSUR

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.268 ^a	.072	.067	6,24888

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1 Regression	605.958	1	605.958	15.518	.000 ^b
Residual	7809.706	200	39.049		
Total	8415.663	201			

Πίνακας 3: Έλεγχος στατιστικής σημαντικότητας του γραμμικού μοντέλου παλινδρόμησης.

Source	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	363,193	363,193	110,170	< 0,0001
Error	672,517	3,297		
Corrected Total	1035,710			

Πίνακας 4: Έλεγχος στατιστικής σημαντικότητας του μη γραμμικού μοντέλου παλινδρόμησης.

Source	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	553,179	553,179	178,913	< 0,0001
Error	618,379	3,092		
Corrected Total	1171,558			

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Appleman, H., 1959: *An investigation into the formation of hail*. Nubila, Anno II, No. 1, 28-37.
- Battan, L. J., 1973: *Radar observation of the atmosphere*. The University of Chicago Press, pp.324.
- Billet, J., M. Delisi, and B. J. Smith, 1995-1996: Use of regression techniques to predict hail size and the probability of large hail. *Weather and Forecasting*, volume 12, 154-164
- Bradley, A. A., J. A. Smith, 1994: The hydrometeorological environment of extreme rainstorms in the southern plains of the United States. *Journal of applied meteorology*, volume 33, 1418-1431.
- Browning, K. A., 1977: The structure and mechanics of hailstorms. In "Hail: A review of hail science and hail suppression", G. B. Foote and C. A. Knight, (Eds), Meteor. Monogr., 16, No. 38, p. 1-43.
- Browning, K. A., and F. H. Ludlam, 1960: *Radar analysis of a hailstorm*. Imperial college of science and technology, London, Department of meteorology, pp. 109.
- Byers, H. R., and R. R. Braham, Jr., 1949: *The thunderstorm*. U.S. Government Printing Office, Washington, D. C., pp. 287
- Charba, J. P., 1975: Operational scheme for short range forecasts of severe local weather. *Ninth Conf. on Severe Local Storms*, Norman, OK, Amer. Meteor. Soc., 51-57.
- Dennis, A. S., 1980: Weather modification by cloud seeding. *International Geophysics Series*, vol. 24, Academic Press, pp. 267.
- Dixon, M. J., and G. Wiener, 1993: TITAN: A radar-based meteorology. *J. Atmos and oceanic technology*, 785-787.
- Doswell III C. A., 1987: The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection: A case study example. *Weather and forecasting*, volume 2, 3-16.
- Fedorov, Y. K., 1974: *Weather and climate modification*, W.N. Hess ed., Wiley, New York, 387-409.
- Flocas, A. A. (1984). The annual and seasonal distribution of fronts over central-southern Europe and the Mediterranean. *International Journal of climatology*, 4(3), 255-267.
- Fotheringham A. S. and P. A. Rogerson, 1993: GIS and spatial analytical problems. *Geographical indofmation systems*, volume 7, No. 1, 3-19.
- Galton F., 1885: Regression towards mediocrity in hereditary stature. *Journal of the Anthropological Institute* 15, 246-263.
- Galway, J. G., 1956: The lifted index as a predictor of latent instability. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 37, 528-

- Garcon, E., A. Merino, J. L. Sanchez, S. Fernandez-Gonzalez, E. Garcia-Ortega, L. Lopez, L. Hermida, 2015: Spatial distribution of thermodynamic condition of severe storms in southwestern Europe. *Atmospheric research*, 164-165, 194-209.
- George, J. J., 1960: *Weather forecasting for aeronautics*. Academic Press, pp. 411.
- Glickman, T. S. (Ed.), 2000: *Glossary of Meteorology*, Amer. Meteor. Soc., pp. 855.
- Huschke, R. E., 1959: *Glossary of Meteorology*. Amer. Meteor. Soc., Boston, MA, pp. 638.
- Karacostas, T. S., 1984: The design of the Greek Hail Suppression Program. *Ninth Conference on Weather Modification*. Amer. Meteor. Soc., Park City, Utah, U.S.A., 26-27.
- Karacostas, T. S., 1989: The Greek national suppression program: design and contact of the experiment, *Proc. 5th WMO Science Conference on weather modification and applied cloud physics*, 605-608.
- Karacostas, T. S., 1990: The development of an index as an aid in forecasting mesoscale convective storms over North-Central Greece. *21st International Conference for Alpine Meteorology, Engelberg, Switzerland*, 227-230.
- Karacostas, T. S., 1991: Some characteristics of convective cells in the Greek national hail suppression program. *Second Yugoslav conference on weather modification*, 43-50.
- Karacostas T. S., O. K. Kakaliagou and E. A. Flocas, 1991: An objective evaluation of two instability indices associated for forecasting convective storms of north-central Greece. *Second Yugoslav conference on weather modification*, 51-59.
- Karakostas, T. S., and M. B. Sioutas, 1992: Correlation of precipitable water and convective thunderstorms precipitation height in central Macedonian area. *Proceedings of the 1st National Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics*, Aristotelean University of Thessaloniki, 503–507.
- Karacostas, T. S., 2003: The evaluation of the Greek national hail suppression project. In *Preprints 8th WMO Scientific Conf. on Weather Modification, Casablanca, Morocco*, 267-270.
- Kohler, H., 1988: *Essentials of Statistics*. Scott, Foresman and Company, Illinois, USA.
- Langmuir, I., V. J. Schaefer, B. Vonnegut, K. Maynard, R. Smith-Johannsen, D. Blanchard, R. E. Falconer, 1948: Final Report, Project Cirrus. RL140, General Electric Research Laboratory, Schenectady, pp. 135.
- Livadas G. 1962. The weather in Greece during frost events, (in Greek), Ph.D. Thesis, Aristotle University



Thessaloniki, Thessaloniki, Greece.

- Lopez, L., E. Garcia-Ortega, J. L. Sanchez, 2007: A short-term forecast model for hail. *Atmospheric research* 83, 176-184.
- Lowe P. R., 1977: An approximation polynomial for the computation of saturation vapor pressure. *Journal of applied meteorology*, volume 16, 100-103.
- Maheras, P., 1984: Weather-type classification by factor analysis in the Thessaloniki area. *International Journal of Climatology*, 4(4), 437-443.
- Maheras, P., 1988: The synoptic weather types and objective delimitation of the winter period in Greece. *Weather*, 43(2), 40-45.
- Maheras, P., I., Patrikas, T. S., Karacostas, & C., Anagnostopoulou, 2000: Automatic classification of circulation types in Greece: methodology, description, frequency, variability and trend analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 67(3-4), 205-223.
- Marwitz, J. D., 1972: The structure and motion of severe hailstorms. *Journal of applied meteorology*, volume 11, 166-188.
- Melcon, P., A. Merino, J. L. Sanchez, L. Lopez, E. Garcia-Ortega, 2017: Spatial patterns of thermodynamic conditions of hailstorms in southwestern France. *Atmospheric research* 189, 111-126.
- Michalopoulou H. and C. Jacobides, 1987: Instability indices for the Cyprus area. *Meteorology and atmospheric physics*, Volume 37, 153–158.
- Morgan, G., 1992: THETAPLOT, an equivalent potential temperature design. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 47, 259-265.
- Pruppacher, H. P., and J. D. Klett, 1978: *Microphysics of Clouds and Precipitation*, D Reidel Publishing Company, pp. 714.
- Riley, G.T., R. C., Rudolph, and C. M., Sackiew, 1990: *Greek National Hail Suppression Program-1989 Annual Report*. 392506 Ltd, Thessaloniki, Greece.
- Rinehart R. E., 1991: *Radar for meteorologists*. 2nd ed., University of North Dakota, pp. 334.
- Rogers, R. R., and Yau M. K., 1989: *A short course in cloud physics*, 3rd Edition, Pergamon Press Oxford, pp. 290.
- Ruckstuhl, A., 2010: *Introduction to nonlinear regression*.
<http://stat.ethz.ch/~stahel/courses/cheming/nlreg10E.pdf>
- Sax, R. I., S. A. Changnon, L. O. Grant, W. F. Hirschfeld, P. V. Hobbs, A. M. Kahan and J. Simpson, 1975:



Weather modification: Where are we now and where should we be going? An editorial overview. *Journal of applied meteorology*, volume 14, 652-672.

Schaefer, V. J., 1946: The production of ice crystals in a cloud of supercooled water droplets. *Science*, volume 104, 457-459.

Schaefer, V. J., 1951: *Compendium of meteorology*, Amer. Meteor. Soc., Cloud Physics, pp. 235.

Schiesser, H. H., and A. Waldvogel, 2000: *Hailstorms. In Storms (Vol II)*. Edited by R. Pielke Jr and R. Pielke Sr, Routledge Hazards and Disaster Series, Routledge, London, 133-145.

Showalter, A. K., 1953: A stability index for thunderstorm forecasting. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 34, 250-252.

Sioutas, M. V., and H. A. Floca, 2003: Hailstorms in Northern Greece: synoptic patterns and thermodynamic environment. *Theor. Appl. Climatol.* 75, 189-202.

Strong, G. S., Wilson, W. D., 1983: The synoptic index of convection, Part 2: Applications to regional forecasts of convective complexes. *17th CMOS Congr.*, Banff, Alberta, May 3-5, 18.

Vonnegut B., 1947: The nucleation of ice formation by silver iodide. *Journal of applied physics*, volume 18, 593-595.

Wilson, J. W., N.A. Crook, C. K Mueller, J. Sun, M. Dixon, 1998: Nowcasting thunderstorms: a status report. *Amer. Meteor. Soc.*, 2077-2099.

Wood, 1955: A theory of hail formation. PhD thesis. Massachusetts Institute of Technology.

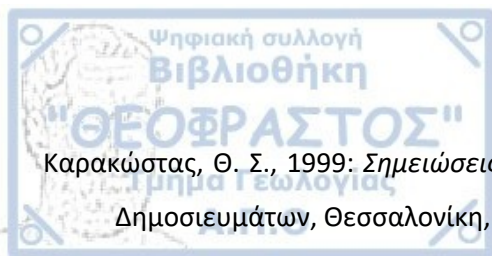
Zak, J.A., 1997: *Forecasting Thunderstorms over a 2- to 5-h period by statistical methods*. NASA Contractor Report 2394, USA, 112p.

Γιαννούλη, Μ., 2000: Συνοπτικές καταστάσεις κατά την περίοδο του Εθνικού Προγράμματος Χαλαζικής Προστασίας. *Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης*. Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Σ.Θ.Ε., Α.Π.Θ.

Δημούτση, Σ., 2005: Ο αεροχείμαρρος και η επίδρασή του στις χαλαζοκαταιγίδες στην περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας. *Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης*. Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Σ.Θ.Ε., Α.Π.Θ.

Ζάνης, Π., 2017: *Σημειώσεις θερμοδυναμικής και στατικής της ατμόσφαιρας*. Α.Π.Θ.

Καρακώστας Θ. Σ., Α. Φλόκας, Ε. Φλόκα, Ο. Κακαλιάγκου και Χ. Ρίζου, 1992: Μελέτη των συνοπτικών καταστάσεων στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου. *Πρακτικά 1^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Φυσικής της Ατμόσφαιρας*, Θεσσαλονίκη, 469-477.



Καρακώστας, Θ. Σ., 1999: *Σημειώσεις φυσικής των νεφών και τροποποίησης καιρού*. Α.Π.Θ., Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Θεσσαλονίκη, σελ. 76.

Κάτος, Α. Β., και Γ. Δ., Πέκος, 1990: *Εφαρμοσμένη Στατιστική*. Πανεπιστήμιο Μακεδονίας Οικονομικών και Κοινωνικών Επιστημών, Τμήμα Διοίκησης Επιχειρήσεων, Θεσσαλονίκη, σελ. 306.

Κατσιμάρδος, 1979: Δείκτες αστάθειας, εμβαδά θερμοδυναμικών διαγραμμάτων και στατική αστάθεια στον Ελλαδικό χώρο. ΕΜΥ, Αθήνα.

Κολυβά-Μαχαίρα και Μπόρα-Σέντα, 1998: *Στατιστική, Θεωρία και Εφαρμογές*. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη

Μακρογιάννης και Σαχσαμάνογλου, 1994: *Στοιχεία γενικής Μετεωρολογίας*. Εκδόσεις Ιανός, Θεσσαλονίκη, σελ. 295.

Μπόρα-Σέντα, Ε. και Χ. Μωυσιάδης, 1992: *"Εφαρμοσμένη στατιστική"*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, σελ. 270.

Πυθαρούλης, Ι., 2016: *Σημειώσεις συνοπτικής μετεωρολογίας*. Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.

Στολάκη, Σ. Ν., 2004: Μελέτη των χαρακτηριστικών των χαλαζοπτώσεων στην περιοχή Ημαθίας - Πέλλας και εκτίμηση αυτών κατά τη διάρκεια του 21ου αιώνα. *Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης*. Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Σ.Θ.Ε., Α.Π.Θ.

Σφυρή, Ε. Ε., 2012: Μελέτη των χαλαζοκαταιγίδων στην περιοχή Ημαθίας-Πέλλας. *Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης*. Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Σ.Θ.Ε., Α.Π.Θ.

Τολικά, Κ., 2017: *Σημειώσεις κλιματικής ανάλυσης*. Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.

Τουρναβίτη, Α. Ν., 1999: Συμβολή στη μελέτη της πρόγνωσης χαλαζοκαταιγίδων στο βορειοελλαδικό χώρο. *Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης*. Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Σ.Θ.Ε., Α.Π.Θ.

Τουρναβίτη, Α. Ν., Μ. Βάρφη, Θ. Σ. Καρακώστας, 2000: Εφαρμογή της Διακρίνουσας Ανάλυσης στην Πρόγνωση Χαλαζοκαταιγίδων. *Πρακτικά 5^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Φυσικής της Ατμόσφαιρας*, 28-30 Σεπτεμβρίου, Θεσσαλονίκη, σελ. 187-194.

Φλόκα, Ε. Α. και Θ. Σ. Καρακώστας, 1988: Συμβολή στην Πρόγνωση καταιγίδων στο Βορειοελλαδικό χώρο. *Meteorologika*, No. 73, σελ. 229-238.

Χατζή, Ε., 1992: Δημιουργία ενός Προγνωστικού Δείκτη Αστάθειας για την Περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας. *Πρακτικά 1ου Πανελληνίου Συνεδρίου Μετεωρολογίας – Κλιματολογίας – Φυσικής της Ατμόσφαιρας*, Θεσσαλονίκη, σελ. 423-430.