



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Χ. ΜΟΥΣΚΟΣ
MSc Φυσικός

ΔΥΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΑΥΞΗΣΗΣ
ΒΡΟΧΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2022



ARISTOTLE UNIVERSITY OF THESSALONIKI



FACULTY OF SCIENCES
SCHOOL OF GEOLOGY



PANAYIOTIS Ch. MOUSKOS
MSc Physicist

POTENTIALITY OF RAIN ENHANCEMENT PROGRAMS IN THE
AREA OF CYPRUS

DISSERTATION THESIS

THESSALONIKI 2022





ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Χ. ΜΟΥΣΚΟΣ
MSc Φυσικός

ΔΥΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΑΥΞΗΣΗΣ ΒΡΟΧΗΣ
ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ

Εκπονήθηκε στον Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ.
Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ. τον Σεπτέμβριο του 2021

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 22/02/2022

Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής Επετηρίδας Τμήματος Γεωλογίας Νο: 228
[λαμβάνεται από το Γραμματεία]

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Θεόδωρος Καρακώστας, Ομότιμος Καθηγητής, Επιβλέπων
Χαράλαμπος Φείδας, Καθηγητής, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής
Ιωάννης Πυθαρούλης, Αναπληρωτής Καθηγητής, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής
Επιτροπής

Εξεταστική Επιτροπή

Θεόδωρος Καρακώστας, Ομότιμος Καθηγητής, Επιβλέπων
Χαράλαμπος Φείδας, Καθηγητής, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής
Ιωάννης Πυθαρούλης, Αναπληρωτής Καθηγητής, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής
Πρόδρομος Ζάνης, Καθηγητής, Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής
Θεόδωρος Μαυρομμάτης, Καθηγητής, Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής
Ιωάννης Τσίρος, Καθηγητής, Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής
Βασίλειος Αμοιρίδης, Διευθυντής Ερευνών, Ε.Α.Α., Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής

© Παναγιώτης Χ. Μούσκος, MSc Φυσικός



Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΔΥΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΑΥΞΗΣΗΣ ΒΡΟΧΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ. – Διδακτορική Διατριβή

© Panayiotis Ch. Mouskos, MSc Physicist

All rights reserved.

POTENTIALITY OF RAIN ENHANCEMENT PROGRAMS IN THE AREA OF CYPRUS. – *Ph.D. Thesis*

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.





ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το 2007 συνάντησα τυχαία στους διαδρόμους του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου τον κύριο Θεόδωρο Καρακώστα και μου είπε πως διοργάνωνε ένα σεμινάριο στην τροποποίηση καιρού. Δεν φανταζόμουν ποτέ πως με την παρακολούθηση του σεμιναρίου ΝΕΦΕΛΗ θα αποκτούσα τόσες γνώσεις και πως εκείνη η περίοδος θα οδηγούσε στην σχέση που εξελίχθηκε με τον κύριο Καρακώστα και κατ' επέκταση στην παρούσα διατριβή. Δάσκαλε σε ευχαριστώ για όλα. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλονται και στα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής, τον κύριο Χαράλαμπο Φείδα και τον κύριο Γιάννη Πυθαρούλη, για την πολύτιμη τους βοήθεια και την απαραίτητη τους καθοδήγηση.

Στις αρχές της ανάθεσης της διατριβής υποβλήθηκε μια πρόταση για στήριξη και χρηματοδότηση στα πλαίσια των Ευρωπαϊκών και Κρατικών υποτροφιών του Ιδρύματος Προώθησης Έρευνας. Η πρόταση ήταν στις επιλέξιμες για χρηματοδότηση και παρόλο που το πρόγραμμα ξεκίνησε ιδανικά, διακόπηκε πριν ολοκληρωθεί, λόγω της εργοδότησης μου στο Τμήμα Μετεωρολογίας. Θερμές ευχαριστίες στο προσωπικό του Κυπριακού Κέντρου Ευρωπαϊκών και Διεθνών υποθέσεων του Πανεπιστημίου Λευκωσίας, του Ιδρύματος Προώθησης Έρευνας και σε όσους ήταν εμπλεκόμενοι στις υποτροφίες. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλονται στον κύριο Κυριάκο Γεωργίου, για την εμπιστοσύνη και την πίστη του στο πρόγραμμα και κυρίως για την ανιδιοτελή συμμετοχή του.

Ευχαριστώ επίσης όλους τους φίλους και συνάδελφους του Τμήματος Μετεωρολογίας για την βοήθεια τους στη συγκέντρωση και παραχώρηση των δεδομένων που αναλύθηκαν και επεξεργάστηκαν σε αυτή τη διατριβή και την άμεση τους ανταπόκριση όσες φορές χρειάστηκαν επιπλέον στοιχεία.

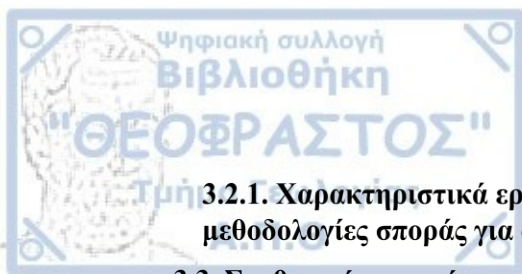
Τέλος την ευγνωμοσύνη και τις πιο θερμές μου ευχαριστίες τις οφείλω στην οικογένεια μου. Στους γονείς μου που με μεγάλωσαν με αρχές και που μου πρόσφεραν όλα τα εφόδια για να πιάσω τους στόχους μου. Περισσότερο από όλους όμως ευχαριστώ την αδερφούλα μου για την αμέριστη αγάπη της, την ενθάρρυνση της όταν μου έλειπαν τα κίνητρα και για όσες φορές χρειάστηκα βοήθεια να ξανασταθώ όρθιος.



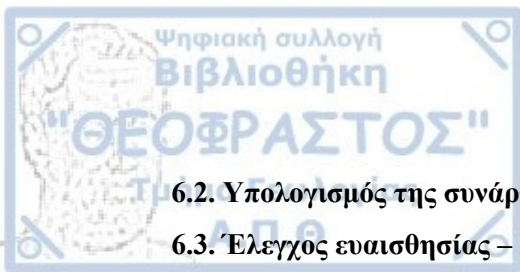


ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1 -
1.1. Ιστορική αναδρομή	1 -
1.2. Τρόποι σποράς	2 -
1.3. Τρόποι επέμβασης	3 -
1.4. Αντικειμενικός στόχος και δομή της διατριβής.....	8 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΤΟ ΚΛΙΜΑ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ	11 -
2.1. Γενικά στοιχεία.....	11 -
2.2. Γενικά Κλιματολογικά στοιχεία.....	13 -
2.3. Καιρικά Συστήματα.....	14 -
2.4. Θερμοκρασία	17 -
2.4.1. Θερμοκρασία Αέρα	17 -
2.4.2. Θερμοκρασία Εδάφους	19 -
2.4.3. Θερμοκρασία Θάλασσας.....	21 -
2.5. Κατακρημνίσματα.....	22 -
2.5.1. Βροχόπτωση.....	22 -
2.5.2. Χιονόπτωση.....	24 -
2.5.3. Χαλάζι.....	25 -
2.5.4. Καταιγίδες.....	25 -
2.6. Σχετική υγρασία	26 -
2.7. Ηλιοφάνεια και Ηλιακή ακτινοβολία	26 -
2.8. Άνεμοι.....	27 -
2.9. Εξάτμιση	28 -
2.10. Ορατότητα και ομίχλη	29 -
2.11. Τάσεις Βροχόπτωσης και Θερμοκρασίας στην Κύπρο	29 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Η ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙΡΟΥ ΓΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΒΡΟΧΗΣ	31 -
3.1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΣΠΟΡΑΣ ΝΕΦΩΝ ΓΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΒΡΟΧΗΣ	31 -
3.1.1. Φυσική υπόθεση	32 -
3.1.2. Δυνητικότητα Σποράς.....	34 -
3.1.3. Εκτέλεση σποράς.....	37 -
3.1.4. Υλικά σποράς.....	37 -
3.1.5. Μεταφορά και διασπορά.....	39 -
3.2. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΒΑΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΣΠΟΡΑΣ ΝΕΦΩΝ	40 -



3.2.1. Χαρακτηριστικά ερευνητικών προγραμμάτων που εφάρμοσαν αντίστοιχες μεθοδολογίες σποράς για αύξηση της βροχόπτωσης.....	40 -
3.3. Συνθετική κριτική ανασκόπηση - Επιμέρους συμπεράσματα.....	55 -
3.3.1. Για τα προγράμματα Στατικού τρόπου Σποράς	56 -
3.3.2. Για τα προγράμματα Δυναμικού τρόπου Σποράς	58 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΔΕΚΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ PDSI ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ....	67 -
4.1. Το φαινόμενο της ξηρασίας	67 -
4.2. Η επιλογή του δείκτη	68 -
4.3. Ο δείκτης PDSI για την Κύπρο.....	71 -
4.4. Επιμέρους συμπεράσματα	77 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΟΠΤΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ.....	81 -
5.1. Μεθοδολογία και δεδομένα	82 -
5.2. Συνοπτικοί τύποι κυκλοφορίας.....	83 -
5.2.1. Νοτιοδυτική κυκλοφορία – South West flow (SW).....	83 -
5.2.2. Αυλώνας μεγάλου κυματισμού - Long Wave trough (L1)	84 -
5.2.3. Αυλώνας μικρού κυματισμού - Short Wave trough (L2).....	85 -
5.2.4. Βορειοδυτική κυκλοφορία North - West flow (NW).....	86 -
5.2.5. Ζωνική κυκλοφορία - Zonal flow (ZON)	87 -
5.2.6. Κλειστό χαμηλό - Closed Low (CLO).....	88 -
5.2.7. Αποκομμένο χαμηλό - Cut-Off Low (CUT).....	89 -
5.3. Κατάταξη των συνοπτικών τύπων κυκλοφορίας.....	89 -
5.4. Επιμέρους συμπεράσματα	94 -
5.5. Σύνδεση συνοπτικού τύπου κυκλοφορίας με την βροχόπτωση.....	95 -
5.6. Ανάλυση της κατακόρυφης δομής των καταγίδων ανά συνοπτικό τύπο.	96 -
5.7. Επιμέρους συμπεράσματα	98 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ -	99 -
6.1. Επιλογή των ανεξάρτητων μεταβλητών.....	99 -
6.1.1. Υετίσιμο νερό (Precipitable Water – PW)	100 -
6.1.2. Δείκτης SWEAT (Severe Weather Threat Index).....	101 -
6.1.3. Δείκτης S(TT)	101 -
6.1.4. Δείκτης LI (Lifted Index)	102 -
6.1.5. Δείκτης TT (Total Totals Index).....	102 -
6.1.6. Δείκτης K (K Index).....	103 -
6.1.7. Δείκτης CAPE (Convective Available Potential Energy)	104 -



6.2. Υπολογισμός της συνάρτησης	- 104 -
6.3. Έλεγχος ευαισθησίας – Επιμέρους συμπεράσματα	- 112 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΣΥΝΟΨΗ – ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	- 115 -
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	- 123 -
ABSTRACT	- 124 -
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	- 125 -



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πολυτιμότητα του νερού για όλα τα έμβια όντα του πλανήτη είναι τεράστια και η αξία του είναι ανεκτίμητη. Απόδειξη αποτελεί το γεγονός ότι περιοχές που υπάρχει το πολύτιμο αυτό αγαθό σε αφθονία σφύζουν από ζωή, ενώ αντίθετα περιοχές όπου παρουσιάζεται σε λίγες ποσότητες καταλήγουν σε αποξένωση, τόσο από τον άνθρωπο, όσο και από τους υπόλοιπους οργανισμούς, γενικότερα.

Πολύ πριν τα πρώτα σημάδια πως ο πλανήτης μας οδηγείται σε μια κλιματική αλλαγή, ή μια κλιματική μεταβολή όπως κάποιοι επιστήμονες προτιμούν να υποστηρίζουν, άρχισαν τα πρώτα πειράματα για τροποποίηση των καιρικών συνθηκών με απώτερο σκοπό να εκμεταλλευτεί ο άνθρωπος μέσω της επιστήμης, τις καιρικές συνθήκες προς το όφελος του.

Η τροποποίηση του καιρού σήμερα είναι μια επιστημονική πρακτική που χρησιμοποιείται σε πολλές χώρες του κόσμου με εφαρμογές να είναι τα προγράμματα διάλυσης της ομίχλης στα αεροδρόμια για την βελτίωση της ορατότητας, τα αντιχαλαζικά προγράμματα για προστασία των καλλιεργειών, αλλά πρωτίστως, η αύξηση της βροχόπτωσης, που αποτελεί και το αντικείμενο αυτής της διατριβής.

1.1. Ιστορική αναδρομή

Τα πρώτα πειράματα ξεκίνησαν στα μέσα του περασμένου αιώνα με τα πρώτα αποτελέσματα να παρουσιάζονται από τον Schaefer το 1946 με την ιστορική τότε επίδειξη σποράς νεφών με ξηρό πάγο, όπου πραγματοποιήθηκε μετατροπή υπερτηγμένων υδρατμών σε πυρήνες πάγου. Το 1947 ο Vonnegut ανακάλυψε την ικανότητα του Ιωδιούχου Αργύρου (AgI), ο οποίος έχει παρόμοια δομή με αυτή των κρύσταλλων πάγου, να δρα ως αποτελεσματικός πυρήνας συμπύκνωσης.



Αυτά τα γεγονότα έθεσαν τη βάση για την επέκταση της επιστήμης της φυσικής των νεφών, που οδήγησαν στη σύγχρονη εποχή της επιστήμης της τροποποίησης του καιρού. Η επιστημονική κοινότητα ενδιαφέρθηκε σχεδόν άμεσα για τα αποτελέσματα και ξεκίνησαν να διενεργούνται πειράματα για την τεχνητή διεργασία σχηματισμού βροχής από τα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης, μέσω σποράς αυτών (Kraus και Squires 1947, Leopold και Halstead 1948, Squires και Smith 1949, Smith 1949). Τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα από τα πρώτα πειράματα, σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες ανάγκες της κοινωνίας για νερό, οδήγησαν τα επόμενα χρόνια στη διεξαγωγή ακόμα πιο εξελιγμένων πειραμάτων-προγραμμάτων σποράς νεφών, ανάπτυξη της γνώσης και κατόπιν μοντελοποίησης των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων των νεφών, και κατ' επέκταση στην εφαρμογή επιχειρησιακών προγραμμάτων σποράς. Λεπτομερέστερη αναφορά στα πειράματα και στα αποτελέσματα τους γίνεται στο τρίτο κεφάλαιο της διατριβής.

1.2. Τρόποι σποράς

Για την σπορά των νεφών αναπτύχθηκαν κυρίως τρεις τρόποι, ανάλογα με τις ιδιότητες των νεφών προς τροποποίηση και του επιθυμητού αποτελέσματος. Αυτοί είναι ο Στατικός τρόπος σποράς, ο Δυναμικός τρόπος σποράς και ο Υγροσκοπικός τρόπος σποράς.

Στον Στατικό τρόπο σποράς, η φυσική υπόθεση είναι πως το νέφος εμπεριέχει αρκετή υγρασία και περιεχόμενο σε νερό, αλλά υπολείπεται των πυρήνων συμπύκνωσης για την δημιουργία τέτοιων σταγόνων που να πέσουν στο έδαφος ως βροχή. Η εισαγωγή ουσιών, όπως ο ιωδιούχος άργυρος στο νέφος, αλλάζει αυτή την συνθήκη και ενισχύεται η διαδικασία της συμπύκνωσης πάνω στους επιπλέον πυρήνες για να ενισχυθεί με τη σειρά της η διαδικασία της ανάπτυξης του μεγέθους των νεφοσταγόνων, κάτι που θα οδηγήσει σε περισσότερη βροχόπτωση από αυτήν που θα παρήγαγε υπό φυσιολογικές συνθήκες το νέφος.

Στον Δυναμικό τρόπο σποράς, ο στόχος είναι η διοχέτευση περισσότερης υγρασίας στο νέφος, η οποία προκύπτει από τη ενίσχυση των ανοδικών ρευμάτων σε αυτό. Η διαδικασία είναι σαφώς πιο πολύπλοκη και απαιτείται μια αλυσίδα γεγονότων για πλήρη επιτυχία στην εφαρμογή της. Η φυσική υπόθεση βασίζεται στην ύπαρξη νερού σε υπέρτηξη στο νέφος και την απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων λανθάνουσας

ενέργειας με την παγοποίηση του. Η ενέργεια αυτή μετατρέπεται σε δυναμική, με έντονες ανοδικές κινήσεις, δημιουργώντας και ενισχύοντας τα ανοδικά ρεύματα στο νέφος, μεταφέροντας σ' αυτό περισσότερη υγρασία από τη βάση του, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η τρισδιάστατη έκταση του και να δημιουργείται πολύ περισσότερη βροχόπτωση από αυτό, συγκριτικά με αυτή που θα παραγόταν χωρίς την επέμβαση.

Ο Υγροσκοπικός τρόπος σποράς έχει παρόμοια φυσική υπόθεση με τον στατικό τρόπο. Υποθέτοντας δηλαδή πως το νέφος περιέχει αρκετή υγρασία αλλά υστερεί σε διαδικασίες συμπύκνωσης, εισάγονται σε αυτό υγροσκοπικά υλικά, κυρίως αλατούχες ενώσεις, τα οποία προσελκύουν τους υδρατμούς, μεγαλώνουν σε μέγεθος και δημιουργούνται νεφοσταγόνες αρκετά μεγάλες, ώστε να πέσουν στο έδαφος ως βροχή.

1.3. Τρόποι επέμβασης

Οι τρόποι επέμβασης στα νέφη εξαρτώνται από τις φυσικές ιδιότητες των υποψήφιων προς τροποποίηση νεφών. Πολύ σημαντική παράμετρος είναι η θερμοκρασία της βάσης των νεφών και ο διαχωρισμός τους σε θερμά και ψυχρά νέφη. Η προέλευση του νέφους και ο χαρακτηρισμός του ως θαλάσσιο ή ηπειρωτικό είναι ένα άλλο κριτήριο που υποδηλώνει την περιεκτικότητα και συγκέντρωση του νέφους σε πυρήνες συμπύκνωσης. Όπως είναι φυσικό, η τεχνολογία έχει εξελιχθεί πολύ από τα πρώτα πειράματα και τις πρώτες εφαρμογές, και έτσι σήμερα οι τεχνικές σποράς είναι αποτελεσματικότερες και πιο αυτοματοποιημένες.

Μια τεχνική σποράς που χρησιμοποιείται στην τροποποίηση των ορογραφικών νεφών κάνει χρήση και των επίγειων γεννητριών παραγωγής υλικών σποράς. Τέτοιες γεννήτριες τοποθετούνται στις περιοχές σχηματισμού ορογραφικών νεφών και μπορούν να ενεργοποιούνται, είτε από κάποιον χειριστή στην περιοχή, ή και από απομακρυσμένη τοποθεσία, είτε να ενεργοποιούνται αυτόματα βάση της αναμενόμενης δραστηριότητας. Οι γεννήτριες αυτές είναι συσκευές καύσης του υλικού σποράς και απελευθέρωσης τους υπό μορφή καπνού στο νέφος, με σκοπό της εισαγωγής πυρήνων συμπύκνωσης σε αυτό. Οι γεννήτριες εδάφους μπορούν συγχρόνως να είναι και ένας πλήρως αυτοματοποιημένος σταθμός συλλογής μετεωρολογικών δεδομένων.



Εικόνα 1.1: Γεννήτρια εδάφους καύσης μίγματος ιωδιούχου άργυρου και ακετόνης (source: North American Weather Consultants, NAWC, Inc)

Μια παραλλαγή της γεννήτριας καύσης είναι οι βάσεις φυσιγγίων ή αλλιώς δέντρα πυροτεχνικών φυσιγγίων. Η βάση φυσιγγίων αποτελείται από μια σχηματική διάταξη ώστε να ελευθερώνουν πυρήνες παγοποίησης, ή υγροσκοπικό υλικό, αναλόγως με το νέφος που πρόκειται να τροποποιηθεί. Όπως και οι γεννήτριες εδάφους, έτσι και οι βάσεις φυσιγγίων μπορούν να είναι πλήρως αυτοματοποιημένες, ή να τίθενται σε λειτουργία από κάποιον χειριστή (εικόνες 1.1 και 1.2).



Εικόνα 1.2: Βάση φυσιγγίων ή αλλιώς δέντρο φυσιγγίων (source: North American Weather Consultants, NAWC, Inc)

Επίσης, πειράματα εισαγωγής πυρήνων συμπύκνωσης μέσα στα νέφη πραγματοποιήθηκαν και με τη χρήση ρουκετών. Οι ρουκέτες αυτές εκτοξεύονταν από το έδαφος προς το νέφος, οι οποίες εκρήγνυνταν και απελευθέρωναν το υλικό σποράς μέσα σε αυτό. Η μέθοδος αυτή, αν και σύμφωνα με την τότε βιβλιογραφία παρουσίασε αρκετά καλά αποτελέσματα, εγκαταλείφθηκε σε βάθος χρόνου, λόγω της αδυναμίας υποστήριξης των αποτελεσμάτων, αλλά και της επικινδυνότητας που περιείχε στην ασφάλεια των αερομεταφορών. Σε κάποιες χώρες όμως, όπως η Κίνα, εξελίχθηκε και ακόμα χρησιμοποιείται (εικόνα 1.3).



Εικόνα 1.3: Βάση εκτόξευσης ρουκετών τοποθετημένη σε ειδικά εξοπλισμένο όχημα. (source: Thethirdpole.net, Image: TopPhoto/Alamy)

Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος σποράς σήμερα είναι αυτός με την χρήση καταλλήλως εξοπλισμένων αεροσκάφων. Τα αεροσκάφη που χρησιμοποιούνται στη σπορά νεφών είναι ειδικά διαμορφωμένα, ώστε πρωτίστως να παρέχουν ασφάλεια στο προσωπικό που τα χειρίζονται (Καρακώστας, 1999). Είναι εφοδιασμένα με όργανα μέτρησης και συλλογής δεδομένων διάφορων-απαραίτητων μετεωρολογικών παραμέτρων, μετρητές αιωρούμενων σωματιδίων, ραντάρ και άλλα. Ο τρόπος σποράς μπορεί να είναι, είτε με απελευθέρωση του υλικού σποράς στη βάση του νέφους, είτε με σπορά στις κορυφές των θυγατρικών κυττάρων του νέφους. Για την πρώτη εφαρμογή, δηλαδή τη σπορά στη βάση του νέφους, τοποθετούνται στα πτερύγια του αεροσκάφους ειδικές βάσεις ανάφλεξης των φυσιγγίων ιωδιούχου αργύρου, οι οποίες ενεργοποιούνται από το πλήρωμα όταν πετά στην βάση του νέφους (εικόνες 1.4 και 1.5). Για την δεύτερη εφαρμογή, δηλαδή σπορά από την κορυφή του νέφους, τοποθετείται στην άτρακτο του αεροσκάφους ένα σύστημα εκτόξευσης φυσιγγίων τα οποία αφήνονται μέσα στο νέφος όταν το αεροσκάφος πετά πάνω από την κορυφή του (εικόνα 1.6).



Εικόνα 1.4: Σύστημα αναφλεγόμενων φυσιγγίων στα πτερύγια του αεροσκάφους (source: thenationalnews.com/uae/environment)



Εικόνα 1.5: Καύση πυροτεχνικών φυσιγγίων και απελευθέρωση του υλικού σποράς κατά τη διάρκεια πτήσης του αεροσκάφους στη βάση του νέφους. (source: rathbones.com/knowledge-and-insight/cloud-control)



Εικόνα 1.6: Σύστημα εκτόξευσης πυροτεχνικών φυσιγγίων στην άτρακτο του αεροσκάφους
(source: Bloomberg.com, photographer: Philippe Calia)

Οι πρακτικές αυτές, παρόλο που είναι αξιόπιστες και αποτελεσματικές, δεν παύουν να είναι 70 και πλέον χρόνων. Κατά καιρούς δοκιμάστηκαν νέες τεχνικές, οι οποίες είναι ακόμα υπό εξέλιξη, αλλά αποτελούν την μελλοντική εξέλιξη των εφαρμογών. Τέτοιες είναι οι δοκιμές ενεργοποίησης της διαδικασίας της βροχόπτωσης με παλμικά συστήματα laser (physicsworld.com). Άλλη σύγχρονη εφαρμογή είναι η επέμβαση στα νέφη από μη στελεχωμένα αεροσκάφη (drones), πρακτική που ήδη εφαρμόζεται στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα (www.uaerep.ae).

1.4. Αντικειμενικός στόχος και δομή της διατριβής

Η τροποποίηση των καιρικών συνθηκών αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία, η οποία εξαρτάται από ένα πλήθος παραμέτρων και φυσικών διεργασιών, που ακόμα είναι υπό μελέτη και αξιολόγηση. Βασίζεται στο γεγονός πως ένα νέφος θα σχηματίσει βροχή μόνο από ένα μέρος (ποσό) της διαθέσιμης υγρασίας που διαθέτει, και ο στόχος της είναι να εκμεταλλευτεί -με τεχνητό τρόπο- ένα μεγαλύτερο ποσοστό των υδρατμών

αυτών οι οποίοι δεν θα συμπυκνώνονταν κάτω από κανονικές συνθήκες. Τα νέφη δεν μπορούν να δημιουργηθούν χωρίς ικανοποιητικές συνθήκες υγρασίας και ανοδικών κινήσεων, ούτε μπορούν να μετακινηθούν χωρίς τον άνεμο, όμως, μπορούν να τροποποιηθούν τα θερμοδυναμικά και τα δυναμικά τους χαρακτηριστικά, ώστε να βελτιωθεί η απόδοση τους σε βροχή, πάνω από μια συγκεκριμένη περιοχή.

Στην προκειμένη περίπτωση, η περιοχή που εξετάζεται και μελετάται κατά πόσον τέτοιες καιρικές συνθήκες υπάρχουν, είναι η περιοχή της Κύπρου. Μια περιοχή που τα τελευταία χρόνια περνά από περιόδους ξηρασίας, αλλά με τις ανάγκες της σε νερό να υφίστανται και μάλιστα να αυξάνονται. Μια περιοχή που η γεωργία και η κτηνοτροφία εξασκούνται από μεγάλο μέρος του πληθυσμού και οι απαιτήσεις των ασχολιών αυτών να βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στο νερό. Μια περιοχή που τα μοντέλα κλιματικής αλλαγής δείχνουν πως οδηγείται προς ερημοποίηση, στο κέντρο της οποίας υπάρχει ένα μεγάλο δάσος που δρα ως πνεύμονας του νησιού και του οποίου οι ανάγκες ανανέωσης, μετά από κάθε πυρκαγιά, βασίζονται αποκλειστικά στη βροχόπτωση. Στη βροχόπτωση που βασίζεται και ο εμπλουτισμός του υδροφόρου ορίζοντα ολόκληρου του νησιού.

Η δομή της διατριβής περιλαμβάνει στο δεύτερο κεφάλαιο γεωγραφικά, μετεωρολογικά και κλιματολογικά στοιχεία για την περιοχή ενδιαφέροντος, την Κύπρο. Αναφέρονται στοιχεία για τα συστήματα που επηρεάζουν το νησί και άλλες γενικές μετεωρολογικές πληροφορίες όπως τα κατακρημνίσματα, το εύρος της θερμοκρασίας, η υγρασία και ο άνεμος.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια η ιστορική ανασκόπηση στην τροποποίηση του καιρού, στην ισχύουσα μέχρι σήμερα θεωρία που εφαρμόζεται για τη σπορά νεφών για την αύξηση της βροχόπτωσης, αλλά και σε ένα πλήθος προγραμμάτων αύξησης βροχής που έχουν πραγματοποιηθεί σε διάφορες περιοχές του πλανήτη.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην ξηρασία ως φυσικό φαινόμενο γενικότερα και στην επίδραση που έχει στην Κύπρο. Αυτό γίνεται με τον υπολογισμό του δείκτη ξηρασίας του Palmer, PDSI και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για έξι σταθμούς του νησιού.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μια ανάλυση των συνοπτικών τύπων κυκλοφορίας που επηρέασαν την Κύπρο για μια περίοδο δέκα χρόνων, από το 2000 μέχρι το 2009. Η ανάλυση περιλαμβάνει την κατάταξη επτά τύπων κυκλοφορίας κατά τη διάρκεια του



έτους, μηνιαία αντιστοίχιση και σύνδεση του κάθε τύπου με την βροχόπτωση καθώς και με νεφώσεις έντονης κατακόρυφης ανάπτυξης.

Στο έκτο κεφάλαιο υπολογίζονται συναρτήσεις εκτίμησης – υπολογισμού της αναμενόμενης βροχόπτωσης από τον κάθε συνοπτικό τύπο κυκλοφορίας εφαρμόζοντας τη μέθοδο της πολλαπλής παλινδρόμησης. Η βροχόπτωσης είναι η εξαρτημένη μεταβλητή της μεθόδου και ως ανεξάρτητες μεταβλητές είναι διάφορες θερμοδυναμικές παράμετροι οι οποίοι λήφθηκαν από την ανάλυση των τεφιγραμμάτων της δεκαετούς περιόδου.

Τέλος στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα της διατριβής. Γίνεται ιδιαίτερη αναφορά σε θεωρίες κόστους – οφέλους ενός δυνητικού προγράμματος αύξησης της βροχής και γίνεται αναφορά στα επιμέρους συμπεράσματα, στα συνολικά συμπεράσματα και στην περαιτέρω έρευνα που μπορεί να γίνει με βάση την παρούσα διατριβή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΤΟ ΚΛΙΜΑ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ

2.1. Γενικά στοιχεία

Παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για την γεωγραφία και την τοπογραφία της Κύπρου, καθώς και κάποια κλιματολογικά δεδομένα του νησιού (Wikipedia, Climate_of_Cyprus). Επίσης, γίνεται αναφορά και στα συνοπτικά συστήματα που επηρεάζουν τις καιρικές συνθήκες κατά την περίοδο του έτους. (Το Κλίμα της Κύπρου, 2^η έκδοση, Λευκωσία, 1986).

Η Κύπρος βρίσκεται κατά μέσο όρο σε γεωγραφικό πλάτος 35° βόρεια και γεωγραφικό μήκος 33° ανατολικά. Συγκεκριμένα εκτείνεται από το ακρωτήριο του Ακάμα (Γ.Μ. 32° 18') δυτικά μέχρι το ακρωτήριο του Αποστόλου Ανδρέα (Γ.Μ 34° 34') ανατολικά και από το ακρωτήριο της Λεμεσού (Γ.Π 34° 57') νότια, μέχρι το ακρωτήριο του Αποστόλου Ανδρέα (Γ.Π 35° 67') βόρεια. (πηγή: google maps). Περιβάλλεται από την ανατολική Μεσόγειο θάλασσα και στην επίδραση της θάλασσας αυτής οφείλεται κατά κύριο λόγο το χαρακτηριστικό Μεσογειακό κλίμα του νησιού.



Εικόνα 2.1: Δορυφορική φωτογραφία της Ανατολικής Μεσόγειου θάλασσας, που δείχνει τη θέση της Κύπρου(researchgate.net).

Η Κύπρος έχει έκταση 9,254 τετραγωνικά χιλιόμετρα και χωρίζεται σε τέσσερις φυσικές περιοχές:

- (α) Την οροσειρά του Τροόδους, που βρίσκεται στο κεντρικό-δυτικό μέρος του νησιού. Η ψηλότερη κορυφή της οροσειράς αυτής, ονομάζεται Όλυμπος και έχει ύψος 1,951 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.
- (β) Την οροσειρά του Πενταδάκτυλου, που έχει σχετικά μικρό πλάτος και εκτείνεται κατά μήκος των βόρειων ακτών του νησιού. Η ψηλότερη κορυφή ονομάζεται Κυπαρισσόβουνο και βρίσκεται στα 1024 μέτρα.
- γ) Την πεδιάδα της Μεσαορίας, που βρίσκεται μεταξύ των οροσειρών του Τροόδους και του Πενταδάκτυλου και έχει γενικά χαμηλό υψόμετρο, το οποίο στην περιοχή της πρωτεύουσας Λευκωσίας δεν ξεπερνά τα 180 μέτρα.
- δ) Τις παράλιες πεδιάδες και τις κοιλάδες κατά μήκος των ακτών. Η ακτογραμμή του νησιού υπολογίζεται περίπου ίση με 650 km.



Εικόνα 2.2: Γεωγραφικός χάρτης της Κύπρου. Στα βόρεια φαίνεται η οροσειρά του Πενταδακτύλου και περίπου στο κέντρο η οροσειρά του Τροόδους (source: esa.int)

2.2. Γενικά Κλιματολογικά στοιχεία

Τα κύρια χαρακτηριστικά του μεσογειακού κλίματος της Κύπρου είναι το ζεστό και ξηρό καλοκαίρι που διαρκεί από τα μέσα Μαΐου ως και τα μέσα Σεπτεμβρίου, ο βροχερός αλλά ήπιος χειμώνας με διάρκεια από τα μέσα Νοεμβρίου ως τα μέσα Μαρτίου και οι δύο ενδιάμεσες μεταβατικές εποχές, το φθινόπωρο και η άνοιξη.

Στη διάρκεια του καλοκαιριού η Κύπρος και γενικά η περιοχή της ανατολικής Μεσογείου βρίσκεται κάτω από την επίδραση ενός εποχικού χαμηλού συστήματος πίεσης, που έχει το κέντρο του στη νοτιοδυτική Ασία. Αποτέλεσμα της επίδρασης αυτής είναι οι ψηλές θερμοκρασίες και ο καθαρός ουρανός. Η βροχόπτωση είναι πολύ χαμηλή με μέση τιμή που δεν ξεπερνά το 5% της μέσης ολικής βροχόπτωσης ολόκληρου του έτους.



Στη διάρκεια του χειμώνα η Κύπρος επηρεάζεται από το συχνό πέρασμα μικρών υφέσεων και μετώπων που κινούνται στη Μεσόγειο με κατεύθυνση από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Οι καιρικές αυτές διαταραχές διαρκούν συνήθως από μια μέχρι τρεις μέρες κάθε φορά και δίνουν τις μεγαλύτερες ποσότητες βροχόπτωσης. Η συνολική μέση βροχόπτωση κατά τους μήνες Δεκέμβριο, Ιανουάριο και Φεβρουάριο αντιστοιχεί περίπου με το 60% της βροχόπτωσης ολόκληρου του έτους.

Η οροσειρά του Τροόδους και σε μικρότερο βαθμό η οροσειρά του Πενταδάκτυλου, παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των μετεωρολογικών συνθηκών στις διάφορες περιοχές της Κύπρου, καθώς και στη δημιουργία τοπικών φαινομένων. Η παρουσία επίσης της θάλασσας που περιβάλλει το νησί είναι αιτία δημιουργίας τοπικών φαινομένων στις παράλιες περιοχές.

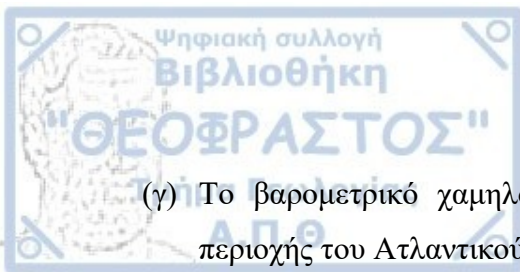
2.3. Καιρικά Συστήματα

Ο όρος καιρικά ή μετεωρολογικά συστήματα αναφέρεται στις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν σε μια μεγάλη περιοχή της ατμόσφαιρας, όπου οι φυσικές ιδιότητες και οι κινήσεις του ατμοσφαιρικού αέρα και τα φαινόμενα που παρατηρούνται στην περιοχή είναι χαρακτηριστικά για ορισμένο είδος καιρικών καταστάσεων. Στην κατάταξη και διαχωρισμό των καιρικών συστημάτων λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης, της θερμοκρασίας, η κατάσταση του ουράνιου θόλου (νεφοκάλυψη και είδος νεφών), οι άνεμοι κλπ.

Τέτοια συστήματα που επηρεάζουν την Κύπρο είναι οι αντικυκλώνες ή τα συστήματα υψηλής πίεσης, οι κυκλώνες ή βαρομετρικά χαμηλά, οι μετωπικές υφέσεις, τα ψυχρά μέτωπα, τα θερμά μέτωπα, οι σφήνες χαμηλής πίεσης και οι σφήνες υψηλής πίεσης. Τα συστήματα αυτά, που είναι κινούμενα, σχετίζονται με τα μεγάλα μόνιμα συστήματα πίεσης του Ατλαντικού, της Ασίας και της Αφρικής. Αυτά τα συστήματα είναι:

Το χειμώνα:

- (α) Ο μόνιμος υποτροπικός αντικυκλώνας των Αζορών.
- (β) Ο Σιβηρικός Αντικυκλώνας.



(γ) Το βαρομετρικό χαμηλό της ερήμου της βόρειας Αφρικής και της τροπικής περιοχής του Ατλαντικού

Το καλοκαίρι:

(α) Ο μόνιμος υποτροπικός αντικυκλώνας των Αζορών.

(β) Το βαρομετρικό χαμηλό της νοτιοδυτικής Ασίας.

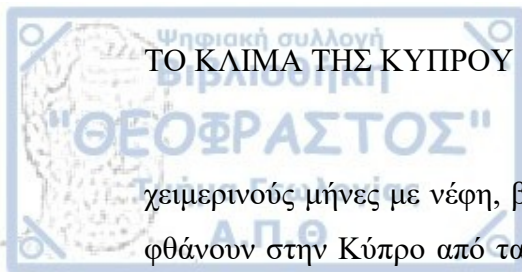
(γ) Το βαρομετρικό χαμηλό της ερήμου Σαχάρα.

Εκτός από τα συστήματα αυτά επηρεάζουν την περιοχή της Κύπρου και δύο άλλα ημιμόνιμα συστήματα γνωστά σαν αεροχειμάρροι. Αυτά είναι ο πολικός αεροχειμάρρος και ο υποτροπικός αεροχειμάρρος. Οι αεροχειμάρροι είναι δυνατά ρεύματα αέρα στην ανώτερη ατμόσφαιρα (συνήθως σε ύψος πάνω από 10 χιλιόμετρα από την επιφάνεια της γης) με κατεύθυνση από τα δυτικά προς τα ανατολικά.

Ο πολικός αεροχειμάρρος ή αεροχειμάρρος του πολικού μετώπου βρίσκεται σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη και επηρεάζει την περιοχή της Μεσογείου το χειμώνα όχι όμως συχνά. Ο υποτροπικός αεροχειμάρρος εντοπίζεται κάποτε νότια και άλλοτε βόρεια της Κύπρου και επηρεάζει τον καιρό της ανατολικής Μεσογείου κυρίως το χειμώνα. Οι θέση του υποτροπικού αεροχειμάρρου στις διάφορες εποχές είναι το χειμώνα $25^{\circ} - 35^{\circ}$ βόρειου γεωγραφικού πλάτους, την άνοιξη $30^{\circ} - 35^{\circ}$, το καλοκαίρι $35^{\circ} - 45^{\circ}$ και το φθινόπωρο στις 35° περίπου.

Στα βόρεια του αντικυκλώνα των Αζορών βρίσκεται η ζώνη από την οποία οι υφέσεις κινούνται προς τα ανατολικά, δηλαδή από τον Ατλαντικό προς τη βόρεια Ευρώπη, κινήσεις που περιγράφονται από το φαινόμενο της Βορειοατλαντικής Ταλάντωσης (North Atlantic Oscillation - NAO). Οι υφέσεις αυτές συνοδεύονται συχνά από ρεύματα ψυχρού αέρα από τα βορειοδυτικά που κατευθύνονται προς τη Μεσόγειο. Οι ψυχρές αέριες μάζες συναντούν τότε το θερμό και υγρό αέρα της λεκάνης της Μεσογείου με αποτέλεσμα να δημιουργείται αστάθεια και να αναπτύσσονται περαιτέρω υφέσεις. Μερικές από τις υφέσεις αυτές κινούνται προς τα ανατολικά και φτάνουν μέχρι και την Κύπρο.

Υφέσεις, μετωπικές υφέσεις, θερμά μέτωπα, ψυχρά μέτωπα και αστάθεια στην ανώτερη ατμόσφαιρα είναι τα πιο συνηθισμένα ασταθή καιρικά συστήματα στους



ΤΟ ΚΛΙΜΑ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ

χειμερινούς μήνες με νέφη, βροχές, χιόνια, καταιγίδες και χαλάζι. Τα συστήματα αυτά φθάνουν στην Κύπρο από τα δυτικά και νοτιοδυτικά. Η περιοχή της προέλευσης τους είναι η κεντρική Μεσόγειος. Την ίδια εποχή, ψυχρές μάζες αέρα εισβάλλουν στην Κύπρο από τα βόρεια και μπορούν να προκαλέσουν ακόμα και χιονόπτωση όταν δημιουργηθεί βαρομετρικό χαμηλό στα βόρεια της Κύπρου.

Όταν δεν υπάρχουν τέτοια συστήματα στην ανατολική Μεσόγειο, η Κύπρος βρίσκεται είτε κάτω από την επίδραση ομοιόμορφης πίεσης είτε κάτω από την επίδραση ζώνης υψηλών πιέσεων και ο καιρός είναι κυρίως αίθριος. Στο τέλος του χειμώνα προς τις αρχές της άνοιξης επηρεάζουν την Κύπρο υφέσεις από τα νοτιοδυτικά με προέλευση τις ερήμους της βόρειας Αφρικής, κυρίως της ερήμου Σαχάρα. Αυτά τα συστήματα συνήθως μεταφέρουν μαζί τους σκόνη από την έρημο.

Κατά τη μεταβατική εποχή της άνοιξης ο Σιβηρικός αντικυκλώνας διαλύεται και δημιουργείται ένα μεγάλο βαρομετρικό χαμηλό πάνω από τη νοτιοδυτική Ασία με προέκταση προς τη Μικρά Ασία. Παρόμοιο βαρομετρικό χαμηλό εμφανίζεται και πάνω από τη Σαχάρα. Τα συστήματα αυτά αρχίζουν να εμφανίζονται τον Απρίλιο και διαρκούν μέχρι και τον Ιούνιο.

Τα ασταθή καιρικά συστήματα που επηρεάζουν τον καιρό στην περιοχή της Κύπρου την άνοιξη είναι της ίδιας μορφής με αυτά του χειμώνα μόνο που η συχνότητα, η διάρκεια και η έντασή τους είναι σχετικά πιο μικρή. Επίσης την άνοιξη επηρεάζουν την Κύπρο και υφέσεις από τις ερήμους της βόρειας Αφρικής.

Από το τέλος της άνοιξης αρχίζει να επηρεάζει την Κύπρο το εποχικό βαρομετρικό χαμηλό που έχει το κέντρο του στη νοτιοδυτική Ασία. Αυτό το σύστημα συνεχίζει να επηρεάζει την περιοχή μέχρι τις αρχές του φθινοπώρου με ζεστές και ξηρές μάζες αέρα. Η πιθανότητα να σημειωθούν βροχοπτώσεις με καταιγίδες και χαλάζι στους μήνες του καλοκαιριού είναι σχετικά μικρή. Τέτοια φαινόμενα παρατηρούνται όταν επηρεάζει την Κύπρο κάποιο ασθενές σύστημα χαμηλής πίεσης ή δημιουργείται τοπική αστάθεια λόγω της θέρμανσης του εδάφους και της μεγάλης σχετικής υγρασίας του αέρα. Σε τέτοιες περιπτώσεις παρατηρούνται βροχές κυρίως στις ορεινές περιοχές και στην κεντρική Μεσαορία. Συνήθως με την αποκατάσταση του εποχικού βαρομετρικού χαμηλού πάνω από την Κύπρο στα μέσα Ιουνίου ο καιρός γίνεται αίθριος και θερμός.

Στους μεταβατικούς μήνες του Φθινοπώρου ο Σιβηρικός αντικυκλώνας αρχίζει να δημιουργείται και πάλι και αρχίζει να εξασθενεί το βαρομετρικό χαμηλό πάνω από τη νοτιοδυτική Ασία. Την εποχή αυτή αρχίζουν να επηρεάζουν την Κύπρο ασταθή καιρικά συστήματα από τα δυτικά. Μπορούν επίσης να δημιουργηθούν συνθήκες τοπικής αστάθειας.

Στη διάρκεια ολόκληρου του έτους επηρεάζουν την Κύπρο κατά μέσο όρο περίπου 35 ασταθή καιρικά συστήματα, με το καθένα από αυτά να διαρκεί από μια μέχρι τρεις μέρες. Εκτός από τα πιο πάνω ασταθή καιρικά συστήματα παρατηρούνται άλλες 50 περίπου μέρες κατά τη διάρκεια του έτους κατά τις οποίες η Κύπρος επηρεάζεται από ασταθείς αέριες μάζες ή αστάθεια στην ανώτερη ατμόσφαιρα.

2.4. Θερμοκρασία

2.4.1. Θερμοκρασία Αέρα

Η Κύπρος χαρακτηρίζεται από ζεστό καλοκαίρι και ήπιο χειμώνα, όμως η γενική κατάσταση διαφοροποιείται από περιοχή σε περιοχή από δυο παράγοντες:

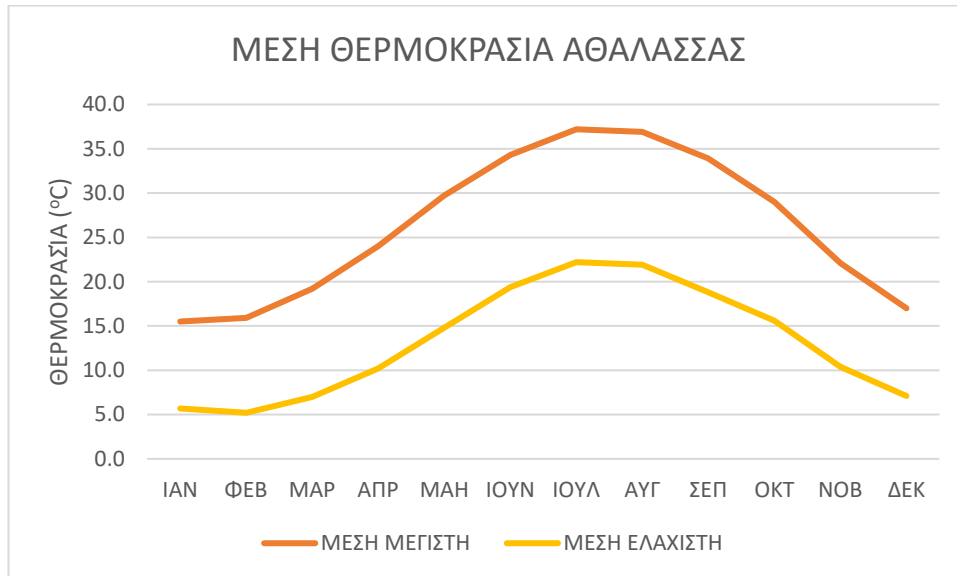
- (α) το ανάγλυφο. Η θερμοκρασία ελαττώνεται κατά περίπου 5 βαθμούς Κελσίου για κάθε χιλιόμετρο ύψους.
- (β) την επίδραση της θάλασσας. Η επίδραση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα πιο δροσερό καλοκαίρι και σχετικά πιο ήπιο χειμώνα στις παράλιες περιοχές και ειδικότερα στις δυτικές, σε σύγκριση με το εσωτερικό του νησιού.

Το ετήσιο εύρος της θερμοκρασίας του αέρα είναι αρκετά μεγάλο και κυμαίνεται γύρω στους 18 βαθμούς Κελσίου στις εσωτερικές περιοχές και γύρω στους 14 βαθμούς Κελσίου στα παράλια.

Οι διαφορές μεταξύ της ψηλότερης θερμοκρασίας ημέρας και της χαμηλότερης θερμοκρασίας νύχτας είναι επίσης μεγάλες κυρίως στις εσωτερικές περιοχές το καλοκαίρι. Το χειμώνα οι διαφορές αυτές είναι 8-10 βαθμούς Κελσίου στις πεδινές περιοχές και 5-6 βαθμούς Κελσίου στις ορεινές. Το καλοκαίρι αυτές αυξάνονται σε

ΤΟ ΚΛΙΜΑ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ

περίπου 16 βαθμούς Κελσίου στην κεντρική πεδιάδα και σε 9-12 βαθμούς Κελσίου στις άλλες περιοχές. Στους μήνες Απρίλιο και Οκτώβριο οι αντίστοιχες τιμές είναι περίπου 10-15 βαθμούς Κελσίου στις πεδινές περιοχές και 7-9 βαθμούς Κελσίου στις ορεινές περιοχές. Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η μέση μηνιαία θερμοκρασία, ελάχιστη και μέγιστη για το σταθμό της Αθαλάσσας, που βρίσκεται το στο εσωτερικό του νησιού σε υψόμετρο περίπου 170 μέτρων.

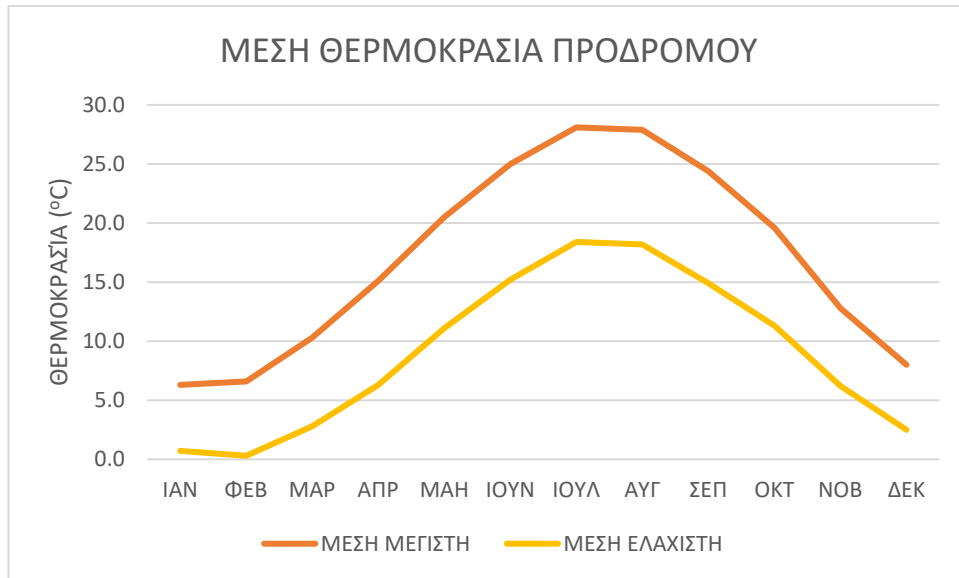


Σχήμα 2.1: Διακύμανση της μέσης μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας για το σταθμό της Αθαλάσσας (εσωτερικό), για την περίοδο 1961-90.

Οι πιο ζεστοί μήνες του χρόνου είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος. Πολύ ψηλές θερμοκρασίες, ειδικότερα στην κεντρική πεδιάδα, σημειώνονται όταν ζεστές και ξηρές αέριες μάζες εισβάλλουν στην Κύπρο κυρίως από τα ανατολικά. Οι μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες κατά τους μήνες αυτούς κυμαίνονται μεταξύ 29 βαθμών Κελσίου στην κεντρική πεδιάδα και 22 βαθμών Κελσίου στις ψηλότερες κορυφές του Τροόδους, ενώ οι μέσες μέγιστες θερμοκρασίες στους μήνες αυτούς είναι 36 και 27 βαθμοί Κελσίου αντίστοιχα.

Οι πιο ψυχροί μήνες του χρόνου είναι ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος. Πολύ χαμηλές θερμοκρασίες σημειώνονται όταν πολικές ή αρκτικές αέριες μάζες εισβάλλουν στην Κύπρο κυρίως από τα βόρεια, ως επίδραση του Σιβηρικού αντικυκλώνα. Τους μήνες αυτούς οι μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες είναι 10 βαθμοί Κελσίου στην κεντρική πεδιάδα και 3 βαθμοί Κελσίου στις ψηλότερες κορυφές του Τροόδους, με μέσες

ελάχιστες θερμοκρασίες 5 και 0 βαθμούς Κελσίου αντίστοιχα. Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η μέση μηνιαία θερμοκρασία για το σταθμό του Προδρόμου, που βρίσκεται το στην οροσειρά του Τροόδους, σε υψόμετρο περίπου 1400 μέτρων.



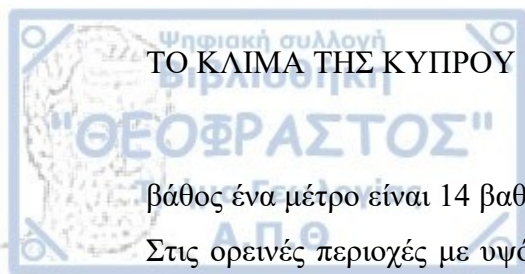
Σχήμα 2.2: Διακύμανση της μέσης μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας για το σταθμό του Προδρόμου (ορεινά), για την περίοδο 1961-90.

Παγετός συμβαίνει συχνά το χειμώνα και την άνοιξη και συνήθως προκαλεί σοβαρές ζημιές στις καλλιέργειες.

Αν και η θερμοκρασία του αέρα ελαττώνεται με το υψόμετρο, σε μερικές περιπτώσεις συμβαίνει αναστροφή της θερμοκρασίας με αποτέλεσμα οι χαμηλότερες θερμοκρασίες νύχτας στις ορεινές περιοχές να είναι σχετικά ψηλές με τιμές που πλησιάζουν τις αντίστοιχες τιμές στις πεδινές περιοχές.

2.4.2. Θερμοκρασία Εδάφους

Η μέση θερμοκρασία εδάφους στις πεδινές περιοχές σε βάθος 10 εκατοστόμετρα είναι περίπου 10 βαθμοί Κελσίου το Γενάρη και 33 βαθμοί Κελσίου τον Ιούλη, ενώ σε



ΤΟ ΚΛΙΜΑ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ

βάθος ένα μέτρο είναι 14 βαθμοί Κελσίου το Γενάρη και 28 βαθμοί Κελσίου τον Ιούλη. Στις ορεινές περιοχές με υψόμετρο 1,000 περίπου μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας οι τιμές αυτές είναι κατά 5 βαθμούς Κελσίου περίπου πιο χαμηλές.

Η απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων ηλιακής ενέργειας στη διάρκεια της μέρας και η μεγάλη απώλεια θερμότητας λόγω ακτινοβολίας τη νύχτα με καθαρό ουρανό προκαλούν μεγάλη ημερήσια κύμανση της θερμοκρασίας του επιφανειακού στρώματος του εδάφους το καλοκαίρι.

Τον Ιούλη η θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους στις πεδινές περιοχές είναι 15 βαθμοί Κελσίου την αυγή και 60 βαθμοί Κελσίου 2-3 ώρες μετά το μεσημέρι. Σε βάθος 5 εκατοστόμετρα οι αντίστοιχες τιμές είναι 24 και 42 βαθμοί Κελσίου, ενώ σε βάθος 50 εκατοστόμετρα η ημερήσια κύμανση της θερμοκρασίας είναι ασήμαντη.

Η απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων ηλιακής ενέργειας κατά τη διάρκεια της μέρας και η μεγάλη απώλεια θερμότητας λόγω ακτινοβολίας τη νύχτα, με καθαρό ουρανό, προκαλούν μεγάλη ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του επιφανειακού στρώματος του εδάφους κυρίως το καλοκαίρι.

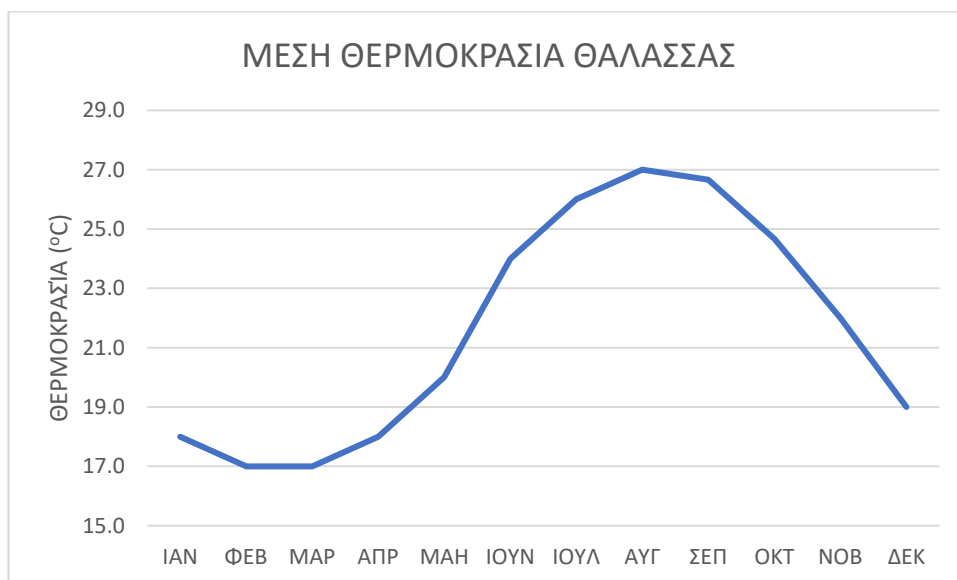
Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες στην επιφάνεια του εδάφους στις εσωτερικές πεδινές και ορεινές περιοχές είναι πιο κάτω από τις αντίστοιχες θερμοκρασίες στις παράλιες περιοχές. Το ετήσιο εύρος των θερμοκρασιών αυτών κυμαίνεται μεταξύ 12-13 βαθμών Κελσίου στις παράλιες περιοχές και 13-16 βαθμών Κελσίου στις εσωτερικές πεδινές και ορεινές περιοχές.

Παγετός εδάφους συμβαίνει συχνά το χειμώνα. Ο αριθμός των ημερών παγετού εδάφους στις εσωτερικές πεδινές και ορεινές περιοχές είναι μεγαλύτερος σε σύγκριση με τις παράλιες περιοχές. Ο μέσος αριθμός ημερών παγετού εδάφους στη διάρκεια του χρόνου κυμαίνεται από 3 μέχρι 10 κοντά στις παράλιες περιοχές και από 20 μέχρι 40 στις εσωτερικές πεδινές περιοχές, ενώ στις ορεινές περιοχές μπορεί να είναι της τάξης των 100 ημερών το χρόνο. Στις παράλιες περιοχές παγετός εδάφους αρχίζει να σημειώνεται από το Δεκέμβριο μέχρι και το Μάρτιο, ενώ στις άλλες περιοχές αρχίζει πιο νωρίς, από Νοέμβριο και τελειώνει πιο αργά, τέλος Μαρτίου ή μέσα Απριλίου.

2.4.3. Θερμοκρασία Θάλασσας

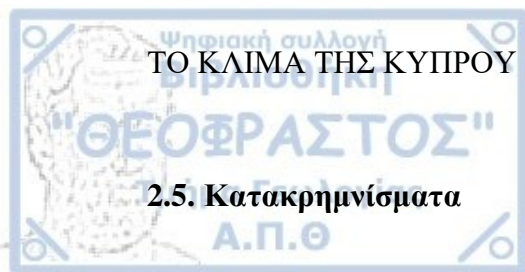
Η ημερήσια κύμανση της θερμοκρασίας του νερού της θάλασσας είναι σημαντική μόνο στα πολύ ρηγά νερά με βάθος λιγότερο από ένα μέτρο. Σε νερά με μεγαλύτερο βάθος η κύμανση αυτή είναι πολύ μικρή.

Η θερμοκρασία του επιφανειακού νερού στην ανοιχτή θάλασσα είναι πάνω από 22 βαθμούς από τον Ιούνιο μέχρι τον Νοέμβριο και φτάνει μέχρι και τους 27 βαθμούς Κελσίου τον Αύγουστο. Στους τρεις πιο ψυχρούς μήνες του χρόνου η θερμοκρασία του επιφανειακού θαλάσσιου νερού κατεβαίνει στους 16 ή 17 βαθμούς Κελσίου μόνο.



Σχήμα 2.3: Διακύμανση της μέσης θερμοκρασίας θάλασσας, για την περίοδο 1961-90.

Κοντά στις ακτές με βάθος νερού 3 - 4 μέτρα οι θερμοκρασίες είναι παρόμοιες με αυτές στην ανοιχτή θάλασσα και κυμαίνονται μεταξύ 15 και 17 βαθμούς Κελσίου το Φεβρουάριο και κυμαίνονται μεταξύ 23 και 28 βαθμών τον Αύγουστο. Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζεται μέση τιμή της θερμοκρασίας της θάλασσας όπως προκύπτει από τις καταγραφές σε τρία λιμάνια της Κύπρου, της Πάφου στα νοτιοδυτικά, της Λάρνακας στα νοτιοανατολικά και της Λεμεσού που βρίσκεται στα νότια του νησιού.



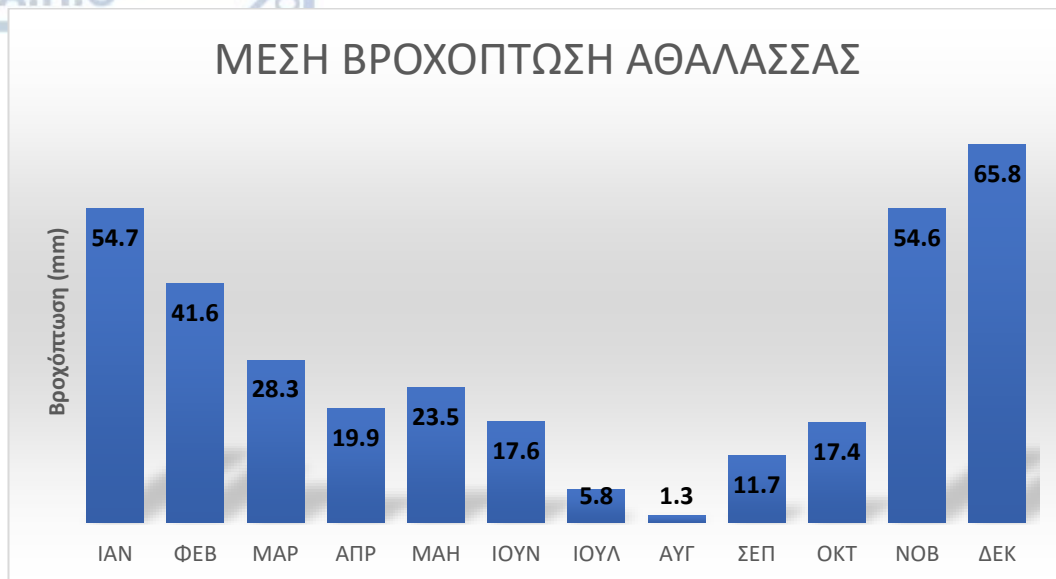
Η μέση κατακρήμνιση πάνω από ολόκληρη την Κύπρο για το χρόνο ως σύνολο είναι περίπου 515 χιλιοστά (μέση τιμή για την περίοδο 1951-1980). Για τις ελεύθερες περιοχές η μέση ετήσια βροχόπτωση για την περίοδο 1961-1990 ήταν περίπου 503 χιλιοστά. Η μέση ετήσια βροχόπτωση κυμαίνεται μεταξύ 300 χιλιοστών περίπου στην κεντρική πεδιάδα, μέχρι και 1100 χιλιοστών περίπου στην οροσειρά του Τροόδου.

Από τα στοιχεία που υπάρχουν η πιο χαμηλή καταγραφή στην Κύπρο ήταν 182 χιλιοστά κατά το υδρομετεωρολογικό έτος Οκτώβριος 1972 - Σεπτέμβριος 1973 και η πιο ψηλή 759 χιλιοστά κατά το υδρομετεωρολογικό έτος Οκτώβριος 1968 - Σεπτέμβριος 1969.

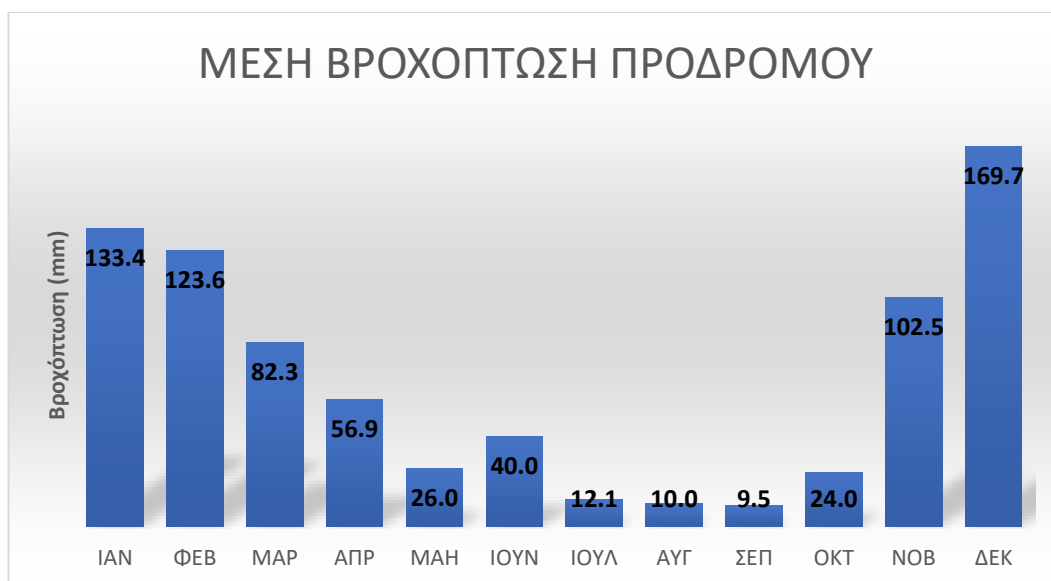
2.5.1. Βροχόπτωση

Τα συστήματα που προκαλούν βροχή είναι οι υφέσεις, τα μέτωπα, η αστάθεια στην ανώτερη ατμόσφαιρα και η τοπική αστάθεια στην κατώτερη ατμόσφαιρα. Συνθήκες τοπικής αστάθειας συμβαίνουν συνήθως στο τέλος της άνοιξης και το καλοκαίρι λόγω της θέρμανσης του εδάφους και της ανόδου του αέρα πάνω από την ξηρά και μπορεί να δώσουν βροχές, καταιγίδες και χαλάζι στις εσωτερικές πεδινές και ορεινές περιοχές.

Η επίδραση του ανάγλυφου της ξηράς πάνω στην κατανομή της βροχόπτωσης είναι σημαντική. Η μέση ετήσια βροχόπτωση στις νοτιοδυτικές προσήνεμες περιοχές της οροσειράς του Τροόδου κυμαίνεται από 450 mm περίπου στους πρόποδες μέχρι 1100 mm στην κορυφή του Ολύμπου. Στις υπήνεμες πλαγιές η βροχόπτωση ελαττώνεται σταθερά κατεβαίνοντας προς τα βόρεια και τα ανατολικά με τιμές μεταξύ 300 και 350 mm στην κεντρική πεδιάδα και τις πεδινές νοτιοανατολικές περιοχές. Η οροσειρά του Πενταδάκτυλου στο βόρειο τμήμα του νησιού προκαλεί σχετικά μικρή αύξηση στη βροχόπτωση που φτάνει τα 550 mm στις κορυφογραμμές της. Στα σχήματα 2.4 και 2.5 παρουσιάζεται η διακύμανση της μέσης μηνιαίας ποσότητας της βροχόπτωσης για τους σταθμούς Αθαλάσσας και Προδρόμου αντίστοιχα.



Σχήμα 2.4: Μέσης τιμή μηνιαίας βροχόπτωσης θερμοκρασίας για το σταθμό της Αθαλάσσιας (εσωτερικό), για την περίοδο 1961-90.



Σχήμα 2.5: Μέσης τιμή μηνιαίας βροχόπτωσης θερμοκρασίας για το σταθμό για το σταθμό του Προδρόμου (ορεινά), για την περίοδο 1961-90.

Κατά μέσο όρο η ποσότητα της βροχόπτωσης από τον Νοέμβριο μέχρι τον Μάρτιο είναι περίπου 380 χιλιοστά και αντιπροσωπεύει περίπου το 80% της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης. Οι δυτικές και νότιες περιοχές του Τροόδου δέχονται περισσότερη βροχή από τις αντίστοιχες ανατολικές περιοχές, καθώς τα περισσότερα



καιρικά συστήματα του χειμώνα που δίνουν βροχές είναι κυρίως οι υφέσεις και τα μέτωπα που φτάνουν στην Κύπρο από τα δυτικά. Οι περίοδοι βροχής είναι σχετικά σύντομες και διαρκούν συνήθως μερικές ώρες. Όταν όμως κάποια ύφεση κινείται πολύ αργά ή παραμένει για σχετικό μεγάλο χρονικό διάστημα στάσιμη στην περιοχή της Κύπρου η βροχή μπορεί να διαρκέσει αρκετές ώρες. Οι βροχές είναι συνήθως μέτριας μέχρι μεγάλης έντασης. Βροχές με πάρα πολύ μεγάλη ένταση έχουν συμβεί σε μερικές μόνο περιπτώσεις.

Την άνοιξη και το φθινόπωρο η βροχόπτωση προέρχεται από υφέσεις ή μέτωπα που φτάνουν στην Κύπρο από τα δυτικά ή από συνθήκες τοπικής αστάθειας. Οι βροχές είναι κυρίως τοπικού χαρακτήρα. Η βροχόπτωση του καλοκαιριού είναι πολύ χαμηλή. Οι βροχές έχουν επίσης τοπικό χαρακτήρα και πέφτουν στις ορεινές περιοχές και στην κεντρική πεδιάδα συνήθως κατά τις πρώτες απογευματινές ώρες.

2.5.2. Χιονόπτωση

Χιονόπτωση συμβαίνει σπάνια στην οροσειρά του Πενταδακτύλου και ακόμα πιο σπάνια στις πεδινές περιοχές. Συμβαίνει όμως συχνά, κάθε χειμώνα σε περιοχές της οροσειράς του Τροόδους με υψόμετρο πάνω από 1000 μέτρα και αυτό γίνεται όταν ψυχρά μέτωπα από τα δυτικά ή ψυχρές πολικές ή αρκτικές αέριες μάζες από τα βόρεια επηρεάζουν την περιοχή της Κύπρου.

Κατά μέσο όρο η πρώτη χιονόπτωση παρατηρείται μέσα στην πρώτη βδομάδα του Δεκεμβρίου και η τελευταία γύρω στα μέσα Απριλίου. Το χιόνι δεν καλύπτει μόνιμα το έδαφος καθ' όλη τη διάρκεια του χειμώνα, για αρκετές όμως βδομάδες στους πιο ψυχρούς μήνες του χρόνου το ύψος του χιονιού είναι σημαντικό, κυρίως στις βόρειες πλαγιές του Τροόδους. Μετά την τελευταία χιονόπτωση το χιόνι μπορεί να εξακολουθήσει να καλύπτει το έδαφος στις επόμενες δέκα μέχρι και δεκαπέντε μέρες.

Στην κορυφή του Ολύμπου ο μέσος αριθμός ημερών χιονόπτωσης και χαλαζόπτωσης στη διάρκεια του χρόνου είναι 48 μέρες περίπου (μέση τιμή για την περίοδο 1961-1971).

Στην πλατεία Τροόδους ο μέσος αριθμός ημερών χιονόπτωσης στη διάρκεια του χρόνου είναι 36 μέρες περίπου και το μεγαλύτερο ύψος νέου χιονιού μέσα σε 24 ώρες μπορεί να φτάσει τα 40 cm. Το μεγαλύτερο ύψος του συσσωρευμένου χιονιού στο έδαφος μπορεί να φτάσει τα 2 μέτρα και το συνολικό ύψος του νέου χιονιού στη διάρκεια του χειμώνα μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 2,5 μέτρα. Σε μερικές περιπτώσεις τα χιόνια καλύπτουν και περιοχές με υψόμετρο κοντά στα 500 μέτρα.

2.5.3. Χαλάζι

Χαλάζι πέφτει κατά μέσο όρο 2 έως 3 φορές το χρόνο στις πεδινές περιοχές και μέχρι 10 φορές το χρόνο στις ορεινές περιοχές, συνήθως μεταξύ Νοέμβριο και Μάιο. Η πιο πιθανή περίοδος για να συμβεί σοβαρή χαλαζόπτωση είναι από το Δεκέμβριο μέχρι τον Απρίλιο, το χαλάζι όμως που πέφτει νωρίς το καλοκαίρι και το φθινόπωρο είναι το πιο επικίνδυνο, καθώς προκαλεί σοβαρές ζημιές στις καλλιέργειες. Η ζημία παίρνει μεγαλύτερες διαστάσεις αν λάβουμε υπόψη πως κυρίως η Γεωργία αλλά και η Κτηνοτροφία είναι οι βασικές ασχολίες μιας μεγάλης μερίδας των κατοίκων του νησιού. Το χειμώνα τα καιρικά συστήματα που συνήθως δίνουν χαλάζι, είναι τα ψυχρά μέτωπα και οι ψυχρές ασταθείς αέριες μάζες, ενώ στις άλλες εποχές χαλάζι πέφτει σε περιπτώσεις τοπικής αστάθειας.

2.5.4. Καταιγίδες

Οι καταιγίδες στην περιοχή της Κύπρου είναι αποτέλεσμα της δραστηριότητας των υφέσεων και των ψυχρών μετώπων και είναι πιο σφοδρές στην περίοδο από τον Οκτώβριο μέχρι τον Δεκέμβριο, ή λόγω των ανοδικών κινήσεων στην ατμόσφαιρα κυρίως τον Μάιο.

Οι καταιγίδες αποτελούν σπάνιο φαινόμενο για την περίοδο από Ιούνιο μέχρι και Σεπτέμβριο. Παρουσιάζονται όμως κατά μέσο όρο τέσσερις με πέντε μέρες σε κάθε μήνα από τον Οκτώβριο μέχρι τον Ιανουάριο και από δύο μέχρι τρεις μέρες σε κάθε μήνα από τον Φεβρουάριο μέχρι και τον Μάιο.

2.6. Σχετική υγρασία

Η μέση σχετική υγρασία του αέρα κυμαίνεται μεταξύ 60% και 80% το χειμώνα και μεταξύ 40% και 60% το καλοκαίρι με ακόμα πιο χαμηλές τιμές στις εσωτερικές περιοχές του νησιού γύρω στο μεσημέρι.

Το υψόμετρο και η απόσταση από τα παράλια παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των τιμών της σχετικής υγρασίας του αέρα, που σε μεγάλο βαθμό είναι ενδεικτικές των διαφορών στη θερμοκρασία του αέρα από περιοχή σε περιοχή. Στη διάρκεια της ημέρας κατά το χειμώνα και σε όλες τις νύχτες του χρόνου η σχετική υγρασία κυμαίνεται κυρίως μεταξύ 65% και 95%. Τα μεσημέρια του καλοκαιριού η σχετική υγρασία κατεβαίνει πολύ χαμηλά. Στην κεντρική πεδιάδα είναι γύρω στο 30% και κάποτε κατεβαίνει μέχρι και 15%.

Η ημερήσια κύμανση της σχετικής υγρασίας στις παράλιες περιοχές το καλοκαίρι είναι πιο μικρή παρά στην κεντρική πεδιάδα λόγω του φαινομένου της θαλάσσιας αύρας. Επίσης η κύμανση είναι μικρή στις ορεινές περιοχές το χειμώνα λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών.

Στις πιο ψηλές περιοχές του Τροόδους, στους καλοκαιρινούς κυρίως μήνες, η σχετική υγρασία το μεσημέρι και νωρίς το απόγευμα μπορεί να ανέβει πιο ψηλά παρά στις άλλες ώρες της ημέρας λόγω των αναβατικών ανέμων. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στις άλλες εποχές σε μικρότερο όμως βαθμό.

2.7. Ηλιοφάνεια και Ηλιακή ακτινοβολία

Η διάρκεια της ηλιοφάνειας για όλες τις περιοχές της Κύπρου είναι αρκετά μεγάλη σε σύγκριση με πολλές χώρες. Στις πεδινές περιοχές ο μέσος αριθμός ωρών ηλιοφάνειας για ολόκληρο το χρόνο είναι 75% των ωρών που ο ήλιος είναι πάνω από τον ορίζοντα. Σε όλη τη διάρκεια του καλοκαιριού η ηλιοφάνεια είναι κατά μέσο όρο 11.5 ώρες την ημέρα, ενώ τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο που έχουν την πιο μεγάλη νέφωση, η διάρκεια της ηλιοφάνειας ελαττώνεται μόνο σε 5.5 ώρες την ημέρα.

Ακόμα και στις πιο ψηλές περιοχές του Τροόδους στους χειμερινούς μήνες με πολύ μεγάλη νέφωση, η μέση ηλιοφάνεια είναι περίπου 4 ώρες την ημέρα και στους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο η τιμή αυτή φτάνει και τις 11 ώρες. Η μεγαλύτερη δυνατή διάρκεια ηλιοφάνειας, δηλαδή από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου, στην Κύπρο κυμαίνεται από 9.8 ώρες το Δεκέμβριο σε 14.5 ώρες τον Ιούνιο.

Η μεγάλη ηλιοφάνεια και η διαύγεια της ατμόσφαιρας επιτρέπουν σε μεγάλα ποσά της ηλιακής ακτινοβολίας να φτάνουν μέχρι το έδαφος. Σε οριζόντια επιφάνεια η μέση ημερήσια ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας κυμαίνεται από 2 κιλοβατώρες ανά τετραγωνικό μέτρο το χειμώνα, σε 7 κιλοβατώρες ανά τετραγωνικό μέτρο το καλοκαίρι.

2.8. Άνεμοι

Στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου οι γενικοί άνεμοι είναι κυρίως ασθενείς ως μέτριοι δυτικοί ή νοτιοδυτικοί το χειμώνα και βόρειοι ή βορειοδυτικοί το καλοκαίρι. Οι πολύ ισχυροί άνεμοι είναι σπάνιοι.

Στις διάφορες περιοχές της Κύπρου οι γενικοί άνεμοι τροποποιούνται από τους τοπικούς ανέμους. Οι τοπικοί αυτοί άνεμοι είναι οι θαλάσσιες και απόγειες αύρες στις παράλιες περιοχές και οι αναβατικοί και καταβατικοί άνεμοι στις ορεινές περιοχές.

Οι θαλάσσιες και απόγειες αύρες οι οποίες παρατηρούνται σε παράλιες περιοχές μπορούν να γίνουν αισθητές σε απόσταση μέχρι και 35 περίπου χιλιόμετρα από την παραλία. Αυτό το σύστημα κυκλοφορίας του αέρα οφείλεται βασικά στη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της ξηράς από τη μια και του νερού της θάλασσας από την άλλη, που δημιουργεί διαφορές στην ατμοσφαιρική πίεση πάνω από την ξηρά και τη θάλασσα.

Τα αντίστοιχα φαινόμενα στις ορεινές περιοχές είναι οι αναβατικοί άνεμοι (αύρες των κοιλάδων) την ημέρα και οι καταβατικοί άνεμοι (αύρες των ορέων) τη νύχτα. Και σ' αυτή την περίπτωση η αιτία της δημιουργίας των τοπικών αυτών ανέμων είναι ο διαφορετικός βαθμός θέρμανσης ή ψύξης γειτονικών περιοχών.



ΤΟ ΚΛΙΜΑ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ

Οι θαλάσσιες αύρες στις παράλιες περιοχές και οι αναβατικοί άνεμοι στις ορεινές περιοχές έχουν τη μεγαλύτερή τους ένταση κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, ενώ οι απόγειες αύρες στις παράλιες περιοχές και οι καταβατικοί άνεμοι στις ορεινές περιοχές έχουν τη μεγαλύτερή τους ένταση κατά τους μήνες του χειμώνα.

Όσον αφορά την ταχύτητα οι άνεμοι στην περιοχή της Κύπρου είναι κυρίως ασθενείς ως μέτριοι. Οι πολύ ισχυροί άνεμοι με ταχύτητα 24 κόμβων και πάνω είναι μικρής διάρκειας και συμβαίνουν σε περιπτώσεις μεγάλης κακοκαιρίας. Οι σφοδροί άνεμοι (ταχύτητας πάνω από 34 κόμβος) είναι σπάνιοι και συμβαίνουν κυρίως στις προσήνεμες περιοχές όταν επηρεάζουν την Κύπρο βαρομετρικά συστήματα χαμηλής πίεσης.

Πολύ σπάνια επίσης συμβαίνουν ανεμοστρόβιλοι πάνω από θάλασσα ή πάνω από ξηρά με διάμετρο περίπου 100 μέτρα.

2.9. Εξάτμιση

Τα μεγάλα ποσά της ηλιακής ενέργειας, η σχετική ξηρασία και η διαρκής κίνηση του αέρα έχουν σαν αποτέλεσμα την εξάτμιση μεγάλων ποσοτήτων νερού ιδιαίτερα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Οι τιμές της εξάτμισης από ελεύθερη επιφάνεια νερού που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια ολόκληρου του έτους κυμαίνονται μεταξύ 1800-2000 mm στις πεδινές περιοχές και 1300 mm στις ψηλότερες περιοχές του Τροόδους.

Το χειμώνα η εξάτμιση είναι σχετικά χαμηλή. Τον Ιανουάριο η μέση μηνιαία εξάτμιση στην κεντρική πεδιάδα και στις πλαγιές του Τροόδους είναι μεταξύ 40 και 50 mm και 25 mm στις ψηλότερες περιοχές του Τροόδους. Στις περισσότερες παράλιες περιοχές η εξάτμιση είναι μεταξύ 70 και 80 mm.

Το καλοκαίρι η εξάτμιση είναι μεγάλη. Τον Ιούλιο η μέση μηνιαία εξάτμιση κυμαίνεται από 250 mm στα δυτικά παράλια και στις δυτικές πλαγιές του Τροόδους, μέχρι και 300 mm στα νοτιοανατολικά παράλια, στην κεντρική πεδιάδα και στις

ανατολικές πλαγιές του Τροόδους. Στα ψηλότερα σημεία της οροσειράς του Τροόδους η μηνιαία εξάτμιση είναι περίπου 220 mm.

2.10. Ορατότητα και ομίχλη

Η ορατότητα είναι συνήθως καλή μέχρι πολύ καλή. Ομίχλη και περιορισμένη ορατότητα συμβαίνει σε μερικές περιπτώσεις κυρίως τις πρωινές ώρες της άνοιξης και του φθινοπώρου και τα βράδια του χειμώνα. Το καλοκαίρι ο σχηματισμός ομίχλης είναι σπάνιος και παρατηρείται κυρίως σε κοιλάδες και σε μερικές παράλιες περιοχές.

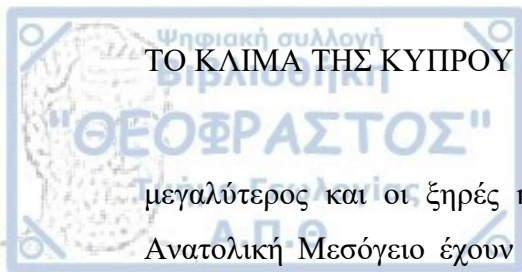
Κατά τη διάρκεια του χειμώνα ομίχλη σχηματίζεται συνήθως τα βράδια, δυο φορές περίπου το μήνα. Η μέση διάρκειά της είναι περίπου δυο ώρες στις πεδινές περιοχές, αλλά είναι μεγαλύτερης διάρκειας στις ορεινές περιοχές που συχνά τα νέφη καλύπτουν τις βουνοκορφές.

Η ορατότητα είναι γενικά πολύ καλή ως και εξαιρετική, όμως σε μερικές μέρες κυρίως της Άνοιξης προκαλείται θόλωση στην ατμόσφαιρα από αιωρούμενα σωματίδια, κυρίως σκόνη, που προέρχεται από τις αφρικανικές έρημους.

2.11. Τάσεις Βροχόπτωσης και Θερμοκρασίας στην Κύπρο

Στη διάρκεια του 20ού αιώνα το κλίμα της Κύπρου, ιδιαίτερα οι δύο βασικές κλιματικές παράμετροι, η βροχόπτωση και η θερμοκρασία, έχουν παρουσιάσει σημαντικές διακυμάνσεις και τάσεις (Zachariadis T., 2012). Παρόμοιες διακυμάνσεις και τάσεις στο κλίμα έχουν παρατηρηθεί και σε πολλές χώρες της Ανατολικής Μεσογείου και της Μέσης Ανατολής, κατάσταση που υποδηλώνει διαφοροποίηση στη γενική κυκλοφορία και συμπεριφορά της ατμόσφαιρας στην περιοχή.

Στην Κύπρο η βροχόπτωση παρουσίασε πτωτική τάση και η θερμοκρασία ανοδική τάση. Οι ρυθμοί μεταβολής της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτεροι στο δεύτερο μισό του αιώνα σε σύγκριση με αυτές στο πρώτο μισό του αιώνα. Στις τελευταίες δεκαετίες ο αριθμός των ετών ολιγομβρίας και ανομβρία είναι



ΤΟ ΚΛΙΜΑ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ

μεγαλύτερος και οι ξηρές και θερμές συνθήκες, τόσο στην Κύπρο όσο και στην Ανατολική Μεσόγειο έχουν επιδεινωθεί. Επίσης τα περισσότερα από τα πιο θερμά χρόνια του αιώνα έχουν παρατηρηθεί στα τελευταία 20 χρόνια. Η εικόνα που παρουσιάζεται από τα κλιματικά μοντέλα (Hadjinicolaou et al., 2011), δείχνει πως η τάση αυτή θα συνεχιστεί με τη βροχόπτωση να παρουσιάζει πτωτική και την θερμοκρασία ανοδική.

Ενώ η μέση ετήσια βροχόπτωση στην πρώτη τριακονταετία του αιώνα ήταν 559 mm, στην τελευταία τριακονταετία έχει ελαττωθεί στα 464 mm, δηλαδή η μέση βροχόπτωση στην Κύπρο είναι τώρα 17% πιο χαμηλή από όσο ήταν στην αρχή του προηγούμενου αιώνα.

Αντίθετα η μέση ετήσια θερμοκρασία στην Κύπρο, τόσο στις πόλεις όσο και στην ύπαιθρο παρουσιάζει ανοδική τάση. Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη στις πόλεις λόγω αστικοποίησης, όμως το γεγονός ότι η αύξηση της θερμοκρασίας παρουσιάζεται και στην ύπαιθρο, είναι ενδεικτικό της γενικής αύξησης της θερμοκρασίας στην περιοχή μας όπως και παγκόσμια. Στην πρωτεύουσα Λευκωσία, η μέση ετήσια θερμοκρασία αυξήθηκε από 18.9°C στην πρώτη τριακονταετία του αιώνα, σε 19.7°C στην τελευταία τριακονταετία, αυξήθηκε δηλαδή κατά 0.8°C.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Η ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙΡΟΥ ΓΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΒΡΟΧΗΣ

3.1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΣΠΟΡΑΣ ΝΕΦΩΝ ΓΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΒΡΟΧΗΣ

Η εφαρμογή της σποράς νεφών για την αύξηση της βροχόπτωσης απαιτεί βασικές γνώσεις της δυναμικής δομής του περιβάλλοντος και των χαρακτηριστικών των νεφών. Θερμικά και δυναμικά αίτια στην ατμόσφαιρα δημιουργούν τις κατακόρυφες κινήσεις του αέρα, απαραίτητες για τη δημιουργία νεφών. Η έναρξη και η εξέλιξη της διαδικασίας της βροχόπτωσης όμως περιλαμβάνει πολύπλοκους φυσικούς μηχανισμούς, μερικοί από τους οποίους συμβαίνουν ταυτόχρονα σε ένα σύννεφο, αλλά με διαφορετικούς ρυθμούς. Σύμφωνα με τον Silverman (1990), η βροχόπτωση μπορεί να προκύψει, είτε από όλες τις υγρές μικροφυσικές διεργασίες, είτε από μικροφυσικές διεργασίες της μικτής φάσης νερού - πάγου που κυριαρχούν στα νεφικά συστήματα που μπορούν να τροποποιηθούν. Η κατανόηση των δυναμικών και των μικροφυσικών αλληλεπιδράσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική, δεδομένου ότι η σπορά νεφών θα είναι πιο αποτελεσματική, εάν αυτές οι μικρές άμεσες επιδράσεις της σποράς, μπορούν να διεγείρουν τις φυσικές διεργασίες για να παράγουν αυξημένη βροχόπτωση.

Η επιστήμη της τροποποίησης του καιρού γενικά, και ιδιαίτερα της αύξησης της βροχόπτωσης, απαιτεί τη σαφή γνώση τεσσάρων σημαντικών τεχνικών ζητημάτων:

- 1) τη φυσική υπόθεση,
- 2) την αναγνώριση των κατάλληλων συνθηκών-ευκαιριών σποράς,
- 3) την εφαρμογή μιας κατάλληλης στρατηγικής σποράς, και
- 4) την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και των επιπτώσεων της σποράς.

Τα πιο σπουδαία και κύρια εργαλεία της αξιολόγησης της επιστήμης αύξησης της βροχόπτωσης είναι, η αριθμητική μοντελοποίηση των νεφών και της σποράς, καθώς και η πειραματική εφαρμογή σποράς των νεφών (in situ operations). Η συνύπαρξη και συνδυασμός αυτών αποτελεί τη βέλτιστη αντιμετώπιση της διαδικασίας.

3.1.1. Φυσική υπόθεση

Η επιστημονική βάση για την αύξηση της βροχόπτωσης από τη σπορά των νεφών βασίζεται σε δύο διαφορετικές φυσικές υποθέσεις, την έννοια της στατικής σποράς και την έννοια της δυναμικής σποράς. Η έννοια της στατικής σποράς έχει εφαρμοστεί σε ψυχρά ορογραφικά σύννεφα για την αύξηση της χιονόπτωσης και κατ' επέκταση του ύψους του συσσωρευμένου χιονιού (snowpack), αλλά και σε θερμά και ψυχρά νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης με σκοπό την αύξηση της βροχής. Η έννοια της δυναμικής σποράς έχει εφαρμοστεί σε θερμά και ψυχρά νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης για την αύξηση της βροχής.

Η έννοια της στατικής σποράς, γνωστή και ως σπορά για μικροφυσικά αποτελέσματα, βασίζεται σε παρατηρήσεις ότι η βροχόπτωση από ορισμένα σύννεφα είναι αναποτελεσματική και στην προσδοκία ότι η διαδικασία βροχόπτωσης μπορεί να γίνει πιο αποτελεσματική με την εισαγωγή επιπλέον εμβρύων-πυρήνων μέσω της σποράς. Η παρουσία του νερού σε ένα σύννεφο που αναμένεται να χρησιμοποιηθεί από τη διαδικασία φυσικής κατακρήμνισης θεωρείται ως απόδειξη της αποτελεσματικότητας της βροχόπτωσης του νέφους. Έχει παρατηρηθεί ότι η βροχόπτωση από τα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης κυμαίνεται μεταξύ του 10 και του 40 τοις εκατό του νερού που συμπυκνώνεται. Η στατιστική στρατηγική σποράς είναι να δημιουργηθεί ένας βέλτιστος αριθμός εμβρύων-πυρήνων βροχόπτωσης για το διαθέσιμο υγρό νερό και να ξεκινήσει η διαδικασία βροχόπτωσης χρονικά νωρίτερα, και σε ορισμένες περιπτώσεις σε χαμηλότερο ύψος στο αναπτυσσόμενο νέφος, από ότι θα συνέβαινε φυσιολογικά. Εάν παράγονται πάρα πολλά πιθανά έμβρυα-πυρήνες νεφοσταγονιδίων για το διαθέσιμο υγρό νερό, τότε κανένα νεφοσταγονίδιο δεν μπορεί να μεγαλώσει αρκετά, ώστε να πέσει στο έδαφος ως ευεργετική βροχή. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το φυσικό νέφος λέγεται «ανενεργό» ως προς τη βροχή, ενώ εάν είναι αποτέλεσμα των διαδικασιών σποράς, τότε λέγεται ότι γίνεται υπερσπορά (overseeding) του νέφους.



Η ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙΡΟΥ ΓΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΒΡΟΧΗΣ

Για τα ψυχρά σύννεφα χρησιμοποιούνται υλικά σποράς για παγοποίηση, όπως ο ιωδιούχος άργυρος (AgI) και ο ξηρός πάγος (CO₂, σε θερμοκρασίες περίπου -40°C), ώστε να διεγερθεί η διαδικασία σχηματισμού παγοκρυστάλλων, με στόχο να παραχθούν περίπου 10-20 παγοκρύσταλλοι ανά λίτρο. Οι παγοκρύσταλλοι αυξάνονται σε μέγεθος με την εναπόθεση υδατμών εις βάρος των σταγονιδίων υπερψυγμένου νερού, επειδή η τάση κορεσμένου υδατμού πάνω από πάγο είναι μικρότερη από εκείνη πάνω από υπέρψυχρο νερό, στην ίδια θερμοκρασία. Για θερμά σύννεφα, η αύξηση της βροχόπτωσης διεγείρεται με την εισαγωγή υγροσκοπικών χημικών σωματιδίων, τα οποία, είτε έχουν ήδη μέγεθος εμβρύου βροχόπτωσης, είτε μπορούν γρήγορα να αυξηθούν σε μέγεθος εμβρύου βροχόπτωσης μέσω συμπύκνωσης.

Η έννοια της δυναμικής σποράς, επίσης γνωστή και ως σπορά για δυναμικά αίτια, βασίζεται σε παρατηρήσεις, ότι η βροχόπτωση από μεγάλα σύννεφα είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν των μικρότερων νεφών, αλλά και την προσδοκία ότι μπορούν να δημιουργηθούν μεγαλύτερα σύννεφα, ενισχύοντας έτσι το ανοδικό ρεύμα μέσω της σποράς. Έχει παρατηρηθεί ότι ο διπλασιασμός στο ύψος των νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης αντιστοιχεί σε περίπου δεκαπλασιασμό του συνολικού όγκου βροχής και ότι τα ψηλότερα νέφη παράγουν μεγαλύτερους συνολικούς όγκους βροχόπτωσης, λόγω μεγαλύτερων περιοχών βροχόπτωσης, του ρυθμού βροχής και της διάρκειας βροχής. Η στρατηγική δυναμικής σποράς είναι να παγοποιηθεί πλήρως τα ανοδικά ρεύματα του νέφους νωρίτερα, χαμηλότερα στο σύννεφο, και πιο γρήγορα, από ότι θα συνέβαινε υπό φυσιολογικές συνθήκες, και με αυτόν τον τρόπο να απελευθερώσει μεγάλες ποσότητες θερμότητας στο ανοδικό ρεύμα, που θα προκαλέσουν πολύ έντονη και αυξημένη ανάπτυξη του νέφους, σε όλες τις διαστάσεις. Η ταχεία παγοποίηση του ανοδικού ρεύματος προκαλείται με σπορά με μεγάλες ποσότητες πυρήνων παγοποίησης, με στόχο την παραγωγή περίπου 100 παγοκρυστάλλων ανά λίτρο.

Όπως συμπεραίνεται, το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα των στατικών και δυναμικών εννοιών σποράς, αλλά και η διαφορά μεταξύ τους, συνοψίζεται στην εξέταση της βασικής έκφρασης για την αποτελεσματικότητα της βροχόπτωσης ενός νέφους, η οποία μπορεί να εκφραστεί από την εξίσωση (1):

$$P = E \times C \quad (1)$$

όπου P είναι η συνολική βροχόπτωση από ένα νέφος, E είναι η απόδοση βροχόπτωσης του νέφους, και C είναι η συνολική ποσότητα νερού που συμπυκνώνεται στο νέφος.

Η στατική σπορά τείνει να ενισχύσει την βροχόπτωση P , βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα της βροχόπτωσης του νέφους E , μέσω τροποποίησης των μικροφυσικών ιδιοτήτων του νέφους. Οι αλλαγές στις δυναμικές ιδιότητες του νέφους που ενδέχεται να προκύψουν ως αποτέλεσμα της σποράς, αναμένεται να έχουν μικρή επίπτωση και δεν αποτελούν μέρος της συσχέτισης των αποτελεσμάτων της στατικής σποράς.

Η δυναμική σπορά, από την άλλη πλευρά, αποσκοπεί στην ενίσχυση της βροχόπτωσης P , αυξάνοντας τη συνολική ποσότητα του προς συμπύκνωση του διαθέσιμου νερού στο νέφος C , μέσω της αύξησης στις διαστάσεις του νέφους.

3.1.2. Δυναμικότητα Σποράς

Τα κριτήρια για σπορά είναι μια πρακτική, αλλά και ουσιαστική, έκφραση της φυσικής υπόθεσης. Χρησιμοποιούνται σε μια προσπάθεια διάκρισης και επιλογής μεταξύ των νεφών, που θα έχουν ως αποτέλεσμα είτε αύξηση, είτε μη μεταβολή, ή ακόμη και μείωση της βροχόπτωσης, μετά τη σπορά. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της μεταβλητότητας, κατά την αξιολόγηση ενός προγράμματος-πειράματος σποράς.

Σύμφωνα με την υπόθεση της στατικής σποράς, ένα σύννεφο θεωρείται ότι μπορεί να τροποποιηθεί, εάν (α) η διαδικασία συμπύκνωσης και συνένωσης μέσα στο σύννεφο είναι αναποτελεσματική, (β) περιέχει διαθέσιμο νερό που υπερβαίνει αυτό που απαιτείται από τη διαδικασία φυσικής κατακρήμνισης από το σύννεφο και (3) θα διαρκέσει για αρκετό χρόνο ώστε να ευνοηθεί η ανάπτυξη επιπρόσθετων νεφοσταγονιδίων σε μεγέθη που μπορούν να φτάσουν στο έδαφος υπερνικώντας τις υφιστάμενες ανοδικές κινήσεις.

Για τη δυναμική σπορά, τα φυσικά κριτήρια παρομοιάζουν αυτά της στατικής σποράς, εκτός από μία σημαντική διαφορά και μία σημαντική προσθήκη. Η σημαντική διαφορά είναι ότι η διαδικασία της συμπύκνωσης και συνένωσης σε ένα δυναμικά τροποποιημένο νέφος πρέπει να είναι αποτελεσματική. Η σημαντική προσθήκη είναι ότι η ατμόσφαιρα πρέπει να έχει τέτοια δυναμική, ώστε να ευνοεί την ανάπτυξη των μεγαλύτερων νεφών που προκαλείται από τη δυναμική διαδικασία σποράς.

Μια συνθήκη σποράς είναι το καθαρό αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης των μικροφυσικών και δυναμικών διεργασιών στα σύννεφα. Οι κατάλληλες συνθήκες σποράς θα υπάρχουν μόνο για σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, που συνήθως αναφέρεται ως "παράθυρο χρόνου σποράς", το οποίο εμφανίζεται κατά τα πρώτα στάδια της ανάπτυξης των νεφών, οπότε η έναρξη της ανάπτυξης της βροχόπτωσης μπορεί να επηρεαστεί. Η θεμελιώδης απαίτηση των κριτηρίων σποράς είναι να αναγνωριστεί μια ευκαιρία σποράς αρκετά νωρίς, που θα επιτρέψει την εκτέλεση της σποράς μέσα στο "παράθυρο χρόνου σποράς".

Η αναγνώριση, ή η πρόβλεψη, των συνθηκών σποράς έχει αποδειχθεί εξαιρετικά δύσκολη. Η προσέγγιση ήταν να προσδιοριστεί ένα αρχικό σύνολο περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών, καθώς και νεφικών συνθηκών, συνήθως από αναλυτικές και αριθμητικές μελέτες μοντέλων, που αντιπροσωπεύουν μια καιρική κατάσταση στην οποία ορισμένα σύννεφα θα μπορούσαν να ανταποκριθούν θετικά στη σπορά. Επομένως, μια ημέρα θεωρείται ότι έχει δυνητικότητα σποράς, εάν χαρακτηρίζεται από τις παραπάνω απαιτούμενες περιβαλλοντικές συνθήκες, ενώ ένα συγκεκριμένο σύννεφο μιας τέτοιας ημέρας θεωρείται δυνητικά τροποποιήσιμο, εάν περιέχει τις απαιτούμενες μικροφυσικές και δυναμικές ιδιότητες κατά τη στιγμή της επιλογής του. Και τα δύο κριτήρια είναι απαραίτητα να συνυπάρχουν, δεδομένου ότι μελέτες νεφών έχουν δείξει, ότι μόνο ένα ποσοστό από κατάλληλα σύννεφα διαρκούν τόσο όσο για να μπορέσουν να τροποποιηθούν, μερικά από τα οποία αποδίνουν θετικά αποτελέσματα, και μερικά από τα οποία δεν δημιουργούν βροχοπτώσεις.

Τα κριτήρια για τον προσδιορισμό του κατά πόσον μια ημέρα έχει δυνατότητα σποράς, γνωστά και ως κριτήρια πειραματικής ημέρας, βασίζονται σε συνοπτικές και θερμοδυναμικές παραμέτρους, όπως το υετίσιμο νερό, τις συνθήκες αστάθειας και τα χαρακτηριστικά του ανέμου. Η τιμή κατωφλίου αυτών των παραμέτρων θα μπορούσε να καθορίζεται με ανάλυση γραμμικής ή πολλαπλής παλινδρόμησης, με την εμφάνιση της βροχόπτωσης ως εξαρτημένη μεταβλητή. Τα προγράμματα αύξησης της βροχόπτωσης που βασίζονται στην έννοια της δυναμικής σποράς χρησιμοποιούν ένα αριθμητικό μοντέλο σταθερής κατάστασης για την πρόβλεψη δυνητικότητας σποράς. Τα κριτήρια επιλογής μιας πειραματικής ημέρας είναι συνήθως η μόνη βάση για να αποφασιστεί εάν θα γίνει σπορά στα περισσότερα επιχειρησιακά προγράμματα.

Οι πρώτες προσεγγίσεις για τον προσδιορισμό της δυναμικότητας σποράς βασίστηκαν σε παρατηρήσεις σε πραγματικό χρόνο και στην κρίση των επιστημόνων ως προς τη μελλοντική ανάπτυξη ενός νέφους. Οι επιστήμονες εφάρμοσαν κριτήρια, όπως η οπτική εμφάνιση και η θερμοκρασία κορυφής του νέφους, ενδείξεις ότι το σύννεφο αναπτύσσεται, ότι θα διαρκέσει τουλάχιστον 30 λεπτά, ότι δεν θα επηρεαστεί από τα γειτονικά σύννεφα και ότι δεν έβρεξε πριν από την επιλογή. Με την έλευση πλέον ειδικά εξοπλισμένων αεροσκαφών με όργανα φυσικής των νεφών, τα επί τόπου (in situ) μικροφυσικά δεδομένα που συλλέγονται κατά τη διάρκεια των πτήσεων πριν την σπορά, έχουν ενσωματωθεί στα κριτήρια επιλογής νέφους. Η τελική επιλογή ενός νέφους για σπορά γίνεται εάν τέτοια χαρακτηριστικά, όπως η περιεκτικότητα του σε υγρό νερό, η συγκέντρωση παγοκρυστάλλων, η κατακόρυφη ταχύτητα και η έκταση του νέφους, είναι εντός προκαθορισμένων ορίων.

Η προοπτική, δυναμικά πιο αποτελεσματικών δεικτών σποράς, έχει προκύψει από έρευνες φυσικής νεφών και εφαρμογή και ανάλυση πειραμάτων αύξησης βροχής. Εξετάστηκαν πρώτα τα ευρήματα που σχετίζονται με τη σπορά ψυχρών νεφών. Έχει αποδειχθεί ότι η θερμοκρασία της βάσης του νέφους είναι ένας καλός δείκτης, του κατά πόσον τα κυρίαρχα έμβρυα βροχόπτωσης να γίνουν παγοκρύσταλλοι ή μεγάλες σταγόνες, με τη μετάβαση από το ένα στάδιο (φάση) στο άλλο να συμβαίνει σε θερμοκρασία βάσης νέφους περίπου 10°C. Η θερμοκρασία αυτή δείχνει εάν η συνένωση στο σύννεφο θα είναι ενεργή, και επομένως εάν η έννοια της στατικής σποράς, ή η έννοια της δυναμικής σποράς, θα είναι πιο εφαρμόσιμη στο σύννεφο. Έχει επίσης αποδειχθεί ότι η στατική σπορά είναι πιο αποτελεσματική στο επίπεδο θερμοκρασίας από -12°C έως -15°C. Για δυναμική σπορά το επίπεδο θερμοκρασίας θα μπορούσε να φθάσει και τους -25°C.

Όπως και με τα ψυχρά σύννεφα, η θερμοκρασία της βάσης των νεφών για τα θερμά είναι καλός δείκτης της αποτελεσματικότητας της συνένωσης στο νέφος. Έχει επίσης αποδειχθεί, ότι απαιτείται έκταση νέφους τουλάχιστον 1.7 χιλιομέτρων ώστε η υγροσκοπική σπορά σωματιδίων να καταλήξει σε αξιόλογη βροχόπτωση στο έδαφος. Από την άλλη πλευρά, έχει αποδειχθεί ότι η διαδικασία συνένωσης θα αποδώσει καλά υπό φυσιολογικές συνθήκες, εάν η έκταση του νέφους υπερβαίνει τα 3 χιλιόμετρα.

Τα παραπάνω ευρήματα υποδηλώνουν ότι εκτός από το "παράθυρο χρόνου σποράς" υπάρχει και "παράθυρο θερμοκρασίας νέφους", ή αλλιώς "παράθυρο έκτασης

νέφους", που ευνοεί τη σπορά. Δεδομένου ότι το μέγεθος ενός σύννεφου καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοδυναμική δομή του περιβάλλοντος στο οποίο εξελίσσεται, τα δεδομένα από τη ραδιοβόλιση της ημέρας χρησιμοποιούνται ως βάση για την εκτίμηση της θερμοκρασίας της βάσης και κορυφής του νέφους, καθώς και το ύψος στο οποίο ένα σύννεφο θα αναπτυχθεί όταν τροποποιηθεί δυναμικά. Τα αριθμητικά μοντέλα νεφών αποτελούν ένα βασικό εργαλείο για την πραγματοποίηση αυτών των εκτιμήσεων.

3.1.3. Εκτέλεση σποράς

Μόλις ένα σύννεφο θεωρηθεί ότι μπορεί να τροποποιηθεί σύμφωνα με συγκεκριμένα προκαθορισμένα κριτήρια, η λειτουργία σποράς πρέπει να εκτελεστεί σύμφωνα με την κατάλληλη υπόθεση σποράς για αύξηση της βροχόπτωσης. Η σωστή εφαρμογή κάθε μιας από τις έννοιες σποράς εξαρτάται, (α) από την εισαγωγή του κατάλληλου υλικού σποράς στο νέφος, (β) της κατάλληλης ποσότητας του υλικού σποράς (συγκέντρωσης πυρήνων συμπύκνωσης), (γ) στον κατάλληλο χώρο-μέρος του νέφους, και (δ) στην κατάλληλη χρονική στιγμή, στο αναπτυσσόμενο νέφος. Οι προσπάθειες επίτευξης του στόχου σποράς περιλαμβάνουν τη χρήση ξηρού πάγου και ιωδιούχου αργύρου για ψυχρά νέφη, και μια ποικιλία υγροσκοπικών χημικών ουσιών για θερμά νέφη.

3.1.4. Υλικά σποράς

Υλικά παγοποίησης: η υπόθεση σποράς ψυχρού νέφους βασίζεται στην παραγωγή συγκεκριμένης συγκέντρωσης παγοκρυστάλλων σε συγκεκριμένη θερμοκρασία στο αναπτυσσόμενο νέφος. Ο ξηρός πάγος και ο ιωδιούχος άργυρος (AgI) είναι τα πιο συνηθισμένα υλικά σποράς που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία παγοκρυστάλλων.

Η αποτελεσματικότητα του ξηρού πάγου στην παραγωγή παγοκρυστάλλων είναι αρκετά γνωστή. Ο ξηρός πάγος είναι ένα ελκυστικό υλικό σποράς, επειδή παράγει κρυστάλλους πάγου σχεδόν αμέσως, και η συγκέντρωση που παράγει εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία. Η σπορά ξηρού πάγου εισάγει ένα μέτρο βεβαιότητας στη σωστή έναρξη της υπόθεσης σποράς ψυχρού νέφους. Ο ξηρός πάγος έχει το επιπλέον

πλεονέκτημα ότι είναι αποτελεσματικός σε θερμοκρασία ακόμα και -2°C . Τα μειονεκτήματα του ξηρού πάγου ως υλικό σποράς είναι το σχετικά ψηλό κόστος, η σύντομη διάρκεια ζωής του και ο περιορισμός στη λειτουργία σποράς στην κορυφή του νέφους, ή τη σπορά μέσα στο νέφος.

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του ιωδιούχου αργύρου ως υλικό σποράς είναι ουσιαστικά αντίθετα με αυτά του ξηρού πάγου. Ο ιωδιούχος άργυρος έχει τα πλεονεκτήματα ότι έχει μεγάλη διάρκεια ζωής, σχετικά χαμηλό κόστος και μπορεί εύκολα να διασκορπιστεί με οποιονδήποτε από τους τρόπους σποράς. Ωστόσο, έχει το μειονέκτημα ότι η αποτελεσματικότητά του ποικίλλει ανάλογα με τη χημική σύνθεση του ιωδιούχου αργύρου, τη θερμοκρασία και τον χρόνο παραμονής του στο νέφος και στα χαρακτηριστικά του ίδιου του νέφους, που το καθιστά δύσκολο να ελεγχθεί και να γίνει γνωστή η ακριβής συγκέντρωση και θέση των παγοκρυστάλλων που παράγονται. Το αποτελεσματικό όριο δραστηριότητας για τα περισσότερα υλικά σποράς ιωδιούχου αργύρου είναι περίπου από -9°C έως -10°C .

Υγροσκοπικοί υλικά: Υγροσκοπικές ενώσεις, είτε ως ξηρή σκόνη, είτε ως αλατούχες ενώσεις, ή διαλυμένα νεφροσταγονίδια, χρησιμοποιούνται για την σπορά θερμών νεφών. Η αποτελεσματικότητα των υγροσκοπικών χημικών ουσιών εξαρτάται πρωτίστως από το μέγεθος, την ομοιομορφία και τη συγκέντρωση των σωματιδίων, και δευτερευόντως από τη συσχέτιση τους με τους υδρατμούς. Ωστόσο, το γεγονός ότι τα σωματίδια είναι υγροσκοπικά, καθιστά πολύ δύσκολη την απόκτηση και διατήρηση του μεγέθους τους, της ομοιομορφίας και της συγκέντρωσης που απαιτείται για τη μέγιστη αποτελεσματικότητα.

Υπάρχουν δύο επιπλέον προβλήματα στην τεχνική σποράς υγροσκοπικών σωματιδίων. Το πρώτο σχετίζεται με τους υπολογισμούς που εμπλέκονται στην εκτέλεση της διαδικασίας σποράς. Ακόμη και αν τα σωματίδια έχουν το βέλτιστο μέγεθος, η ποσότητα του υλικού σποράς που απαιτείται για να επηρεάσει έναν σημαντικό όγκο του νέφους, απαιτούσε παλαιότερα τη χρήση μεγάλων αεροσκαφών για τη μεταφορά των απαιτούμενων ωφέλιμων ποσοτήτων. Η χρήση ξηρής σκόνης αντί υγρών διαλυμάτων είναι πιο πλεονεκτική, δεδομένου ότι μια μεγαλύτερη ποσότητα υγροσκοπικού υλικού μπορεί να μεταφέρεται με το ίδιο κόστος. Σε μια προσπάθεια βελτίωσης της αποτελεσματικότητας της σποράς με ξηρές σκόνες, ορισμένοι επιστήμονες έχουν εισάγει μικρά σωματίδια στη βάση του νέφους, με την προσδοκία

ότι θα αναπτυχθούν γρήγορα μέσω της διαδικασίας συμπύκνωσης σε μέγεθος εμβρύου βροχόπτωσης. Ωστόσο, η διατήρηση του μεγέθους και της ομοιομορφίας της ξηρής σκόνης είναι πολύ δύσκολη και η αποτυχία να επιτευχθεί θα μειώσει γρήγορα την αποτελεσματικότητα. Το δεύτερο πρόβλημα προκύπτει από το γεγονός ότι η πλειονότητα των υγροσκοπικών χημικών που χρησιμοποιούνται για τη σπορά θερμών νεφών είναι είτε καυστικά, είτε διαβρωτικά ή και τα δύο. Τα υδροξείδια και τα χλωρίδια τείνουν να έχουν τις πιο ανεπιθύμητες παρενέργειες, με τα οργανικά χημικά τείνουν να έχουν λιγότερες.

3.1.5. Μεταφορά και διασπορά

Όλα τα υλικά σποράς διανέμονται αρχικά σε πολύ συμπυκνωμένες δόσεις. Κάθετες στήλες παράγονται από αερομεταφερόμενες ρίψεις σωματιδίων ξηρού πάγου ή φυσιγγίων ιωδιούχου αργύρου. Οριζόντιες γραμμές παράγονται από εναέριες γεννήτριες ακετόνης ιωδιούχου αργύρου, από φυσίγγια ιωδιούχου αργύρου και διανομείς υγροσκοπικών σωματιδίων. Καυστήρες γεννητριών ιωδιούχου αργύρου στο έδαφος και υγροσκοπικοί φυσητήρες σωματιδίων δρουν ως σημειακές πηγές. Στη συνέχεια στηρίζεται η μεταφορά και η διασπορά του υλικού σποράς και των παγοκρυστάλλων που παράγονται, για να επιτευχθεί η κατάλληλη συγκέντρωση στον όγκο του επιλεγμένου νέφους, στον κατάλληλο χρόνο στο αναπτυσσόμενο νέφος, όπως απαιτείται από την υφιστάμενη φυσική υπόθεση. Παρόλο που υπονοείται σιωπηρά ότι δεν υπάρχει αρνητική επίπτωση από ψηλές συγκεντρώσεις της διαδικασίας σποράς, έχει αποδειχθεί, σε ορισμένες περιπτώσεις στατικής σποράς, ότι η τοπικά «υπερβολική σπορά» οδηγεί σε μη επιθυμητά αποτελέσματα.

Η σπορά στην κορυφή του νέφους (cloud-top), ή η σπορά μέσα στο νέφος (in-cloud), παρέχει μεγαλύτερη διαβεβαίωση ότι το υλικό σποράς και οι παγοκρύσταλλοι θα εισαχθούν στο κατάλληλο μέρος και χρόνο στο νέφος, αλλά ο διαθέσιμος χρόνος και η κάθετη απόσταση για διασπορά σε όλο τον όγκο που πρόκειται να διασκορπιστεί, είναι αρκετά περιορισμένα. Στην περίπτωση του ιωδιούχου αργύρου και της υγροσκοπικής σποράς, το υλικό σποράς μπορεί να διαχέεται περαιτέρω από τον επιδιωκόμενο στόχο, είτε κόντρα στον άνεμο στη βάση νέφους, είτε από το έδαφος, προκειμένου να αυξηθεί ο διαθέσιμος χρόνος για διασπορά και διάλυση στο νέφος. Η στόχευση και ο συγχρονισμός του αποτελέσματος της σποράς, καθίστανται



Η ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙΡΟΥ ΓΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΒΡΟΧΗΣ

δυσκολότερα, καθώς και η επίγεια σπορά (γεννήτριες εδάφους), η οποία επίσης υποφέρει από αδυναμία ελέγχου της χωρικής κάλυψης σποράς και των συγκεντρώσεων του υλικού σποράς.

3.2. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΒΑΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΣΠΟΡΑΣ ΝΕΦΩΝ

3.2.1. Χαρακτηριστικά ερευνητικών προγραμμάτων που εφάρμοσαν αντίστοιχες μεθοδολογίες σποράς για αύξηση της βροχόπτωσης

Για την απόδειξη της αποτελεσματικότητας της σποράς νεφών έγιναν αρκετά προγράμματα σε βάθος δεκαετιών, δοκιμάζοντας και τον στατικό και τον δυναμικό τρόπο σποράς σε διάφορες χώρες ανά τον κόσμο. Μια αντίστοιχη μελέτη για τη δυνητικότητα εφαρμογής ενός προγράμματος αύξησης βροχής έγινε και από τον Μπαμπζέλη Δ. 2013, για την περιοχή της Θεσσαλίας. Επίσης στα πλαίσια του προγράμματος «ΔΑΦΝΗ» (επιστημονική επίβλεψη Καρακώστας Θ. 2015) παρουσιάζονται μελέτες για το πρόβλημα της ξηρασίας και η δυνητικότητα εφαρμογής προγράμματος αύξησης βροχής στον Ελλαδικό χώρο. Στη συνέχεια αναφέρονται μερικά προγράμματα, των οποίων τα αποτελέσματα αξίζουν ιδιαίτερης προσοχής.

3.2.1.1. Τα προγράμματα του Ισραήλ.

Το πρόγραμμα Israel-1 διενεργήθηκε την περίοδο 1961 – 1967 (Gagin and Neumann, 1976). Σχεδιάστηκε με τυχαία εναλλαγή περιοχών βόρεια και κεντρικά της χώρας, χωρισμένες από μια ικανοποιητική σε μέγεθος ουδέτερη ζώνη (buffer zone). Κάθε μέρα σποράς επιλεγόταν τυχαία μεταξύ των δύο περιοχών, με την περιοχή μη σποράς να θεωρείται ως περιοχή «ελέγχου» της περιοχής «εφαρμογής» (περιοχή σποράς). Η σπορά γινόταν με την διάχυση πυρήνων ιωδιούχου άργυρου, με τη μορφή «καπνού», από ειδικά εξοπλισμένα αεροπλάνα, στις βάσεις των νεφών. Για την αξιολόγηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ο στατιστικός έλεγχος root-double ratio, (RDR), (Gabriel, 1999) και τα αποτελέσματά της έδειξαν μια αύξηση στη βροχόπτωση της τάξης του 15% για το συνδυασμό των δύο περιοχών. Μια περεταίρω ανάλυση στο εσωτερικό των περιοχών εφαρμογής έδειξε μια μέγιστη αύξηση βροχόπτωσης της τάξης του 22%.

Το πρόγραμμα Israel-2 διενεργήθηκε την περίοδο 1969 – 1975 (Gagin and Neumann, 1981). Σε αυτήν την περίπτωση, οι περιοχές που επιλέγηκαν ήταν στα βόρεια και στα νότια της χώρας και πάλι χωρισμένες από μια πιο μεγάλη ουδέτερη ζώνη. Γινόταν τυχαία επιλογή της περιοχής «εφαρμογής» για κάθε πειραματική ημέρα, με την άλλη περιοχή να τίθεται αυτόματα ως περιοχή «ελέγχου». Παρόλο που το πρόγραμμα ξεκίνησε με στόχο την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων του πρώτου πειράματος (Israel-1), έγιναν τροποποιήσεις στις περιοχές με στόχο το πιθανό όφελος να παρουσιαζόταν στην λίμνη Kinneret, η οποία είναι ο κύριος ταμιευτήρας νερού της χώρας. Παράλληλα με τις σπορές από αεροσκάφη, στήθηκε και ένα δίκτυο με γεννήτριες εδάφους και στις δύο περιοχές του προγράμματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν μια αύξηση στη βροχόπτωση στη βόρεια περιοχή της τάξης του 13%, με το μέγιστο να φθάνει στο 18%, και να παρουσιάζεται στην περιοχή της λίμνης Kinneret. Μια περαιτέρω ανάλυση από τους Gabriel και Rosenfeld (1990) για τις δύο περιοχές ξεχωριστά, έδειξε μια αύξηση 15% στη βόρεια περιοχή, ενώ αντίθετα στη νότια περιοχή παρουσιάστηκε μια μείωση 17%. Η αξιολόγηση για την περιοχή της λίμνης Kinneret, τις νότιες και κεντρικές περιοχές, ξεχωριστά, απέδωσε παρόμοια αποτελέσματα.

Το πρόγραμμα Israel-3 διενεργήθηκε την περίοδο 1976 – 1991 για την αξιολόγηση της επίδρασης της σποράς μόνο για την νότια περιοχή του προγράμματος Israel-2. Εξαιρέθηκε το νοτιοδυτικό μέρος της περιοχής και τέθηκε ως περιοχή ελέγχου και έγινε σπορά για 682 ημέρες, την περίοδο Νοέμβριος 1976 - Απρίλιος 1991. Όπως παρουσίασαν οι Nirel and Rosenfeld (1994), παρουσιάστηκε μια μείωση 4.2% στη βροχόπτωση συμπεραίνοντας πως η σπορά δεν επηρέασε την βροχόπτωση στη νότια περιοχή.

3.2.1.2. Το πρόγραμμα HIPLEX-1

Το HIPLEX-1 (Smith et al., 1984) ήταν ένα πρόγραμμα που σχεδιάστηκε για να αξιολογήσει τον στατικό τρόπο σποράς για αύξηση της βροχόπτωσης από νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης, και εφαρμόστηκε σε διάφορες φάσεις και σε τρεις διαφορετικές περιοχές των Ηνωμένων Πολιτειών, Montana, Kansas και Texas. Καθορίστηκαν εκ των προτέρων και έγινε προσπάθεια να επαληθευθούν με παρατηρήσεις, όλα τα βήματα στην αλυσίδα των φυσικών διεργασιών που οδηγούν σε

επιπλέον βροχόπτωση. Επιλέχθηκαν τα νέφη cumulus congestus για σπορά με σωματίδια ξηρού πάγου από εξοπλισμένα αεροσκάφη που απελευθέρωναν ποσότητα 0,1 kg/km κοντά στο επίπεδο των -10°C , για 2 λεπτά της ώρας. Τελικά συμπεριελήφθησαν 20 περιπτώσεις κατά τη διάρκεια του διετούς προγράμματος, 12 εκ των οποίων υπέστησαν σπορά, και 8 χωρίς σπορά. Τα στατιστικά αποτελέσματα, σύμφωνα με τους Mielke et al. (1984) έδειξαν ότι η υποτιθέμενη αύξηση στη συγκέντρωση παγοκρυστάλλων στο νέφος που σχετίζεται με τη σπορά, όπως και η επακόλουθη αύξηση του μεγέθους τους, τεκμηριώθηκε ξεκάθαρα, παρά το περιορισμένο δείγμα δεδομένων. Αυτό που παρατηρήθηκε είναι πως 5 περίπου λεπτά μετά τη σπορά, τα περισσότερα σύννεφα δεν συμπεριφέρθηκαν όπως ήταν αναμενόμενο.

Μια φυσική αξιολόγηση από τους Cooper and Lawson (1984) έδειξε ότι σε 4 από τα 12 τροποποιημένα σύννεφα, η βροχόπτωση εξελίχθηκε με τον υποτιθέμενο τρόπο της φυσικής υπόθεσης, αλλά στα άλλα 8 παρατηρήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις. Βρέθηκε ότι: α) το υγρό νερό εξαντλήθηκε γρηγορότερα λόγω ξηρής εισαγωγής περιβαλλοντικού αέρα (entrainment) από όσο η σπορά θα μπορούσε να το εκμεταλλευτεί για να δημιουργήσει βροχόπτωση, β) η δημιουργία βροχόπτωσης δεν προχώρησε μέσω της διαδικασίας graupel όπως είχε υποτεθεί στο μεγαλύτερο μέρος των τροποποιημένων νεφών, αλλά απεναντίας, η κυρίαρχη διαδικασία βροχόπτωσης ήταν ένας συνδυασμός σύγκρουσης και συνένωσης (collision - coalescence), πιθανώς λόγω της υψηλής συγκέντρωσης παγοκρυστάλλων που παράγονται από το σπορά, και γ) η ανάπτυξη της βροχόπτωσης εξελίχθηκε όπως υποτίθεται στα λίγα σύννεφα με σημαντικό ανοδικό ρεύμα, αλλά το επίπεδο σποράς ήταν ίσως πολύ χαμηλό, καθώς δεν κατάφερε να εκμεταλλευτεί την περιοχή ταχείας ανάπτυξης graupel από παγοκρυστάλλους στα επίπεδα περίπου από -12°C μέχρι -20°C .

Λόγω της πειραματικής προσέγγισης, η συμπληρωματική φυσική αξιολόγηση ήταν σε θέση να αναγνωρίσει πού, πώς και γιατί, τα τροποποιημένα νέφη συμπεριφέρθηκαν διαφορετικά από ότι υποστηρίζεται από την υπόθεση του στατικού τρόπου σποράς. Αυτή η φάση του πειράματος επομένως τερματίστηκε και το πρόγραμμα Cooperative Convective Precipitation Experiment ξεκίνησε για να αποκτηθεί καλύτερη κατανόηση των νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης, ειδικά εκείνων



που ήταν μεγαλύτερα από αυτά που τροποποιήθηκαν στο πρόγραμμα HIPLEX-1 (Knight, 1982).

3.2.1.3. Το πρόγραμμα της Ισπανίας.

Η προφανής επιτυχία των ισραηλινών πειραμάτων οδήγησε σε δύο ανεπιτυχείς προσπάθειες μεταφοράς της ισραηλινής τεχνικής σποράς και των αποτελεσμάτων της σε άλλα μέρη του κόσμου, οι οποίες όμως αξίζουν αναφοράς λόγω της προσπάθειας μεταφοράς της τεχνογνωσίας. Αυτές έγιναν από τον World Meteorological Organization στο Precipitation Enhancement Project (WMO PEP) στην Ισπανία (WMO, 1986) και στην Ιταλία (List et al., 1999).

Στην περίπτωση της Ισπανίας, ο WMO επέλεξε τον στατικό τρόπο σποράς ως επιστημονική βάση για το Precipitation Enhancement Project (PEP). Τα σύννεφα θεωρήθηκαν ως κατάλληλα σποράς για αύξηση βροχόπτωσης σύμφωνα με τον στατικό τρόπο σποράς, εάν:

- 1) η διαδικασία σύγκρουσης - συνεννόησης (collision – coalescence) ήταν ανεπαρκής
- 2) ο ρυθμός σχηματισμού υπέρψυχρης συμπύκνωσης υπερβαίνει, ή είναι συγκρίσιμος με το ποσοστό εξάντλησης του υπέρψυχρου νερού και
- 3) εάν υπάρχει επαρκής χρόνος να αναπτυχθούν σωματίδια βροχόπτωσης (νεφοσταγονίδια) που προκαλούνται από τη σπορά, τα οποία να μπορούν να φτάσουν στο έδαφος.

Δυστυχώς ο WMO τερμάτισε πρόωρα τις μελέτες του προγράμματος PEP λόγω δημοσιολογικών περιορισμών. Οι επιτόπιες μελέτες τερματίστηκαν μετά από τρεις σειρές μελετών επιλογής περιοχής, προτού μπορέσει να προσδιοριστεί, αν οι συνθήκες σποράς εμφανίστηκαν αρκετά συχνά σύμφωνα με τον ορισμό του στατικού τρόπου σποράς, για να δικαιολογηθεί η διεξαγωγή του προγράμματος. Διαπιστώθηκε ότι τα κριτήρια σποράς, όπως καθορίζονται από το ορισμό του στατικού τρόπου, ήταν δύσκολο να εφαρμοστούν λόγω έλλειψης ποσοτικοποίησης.

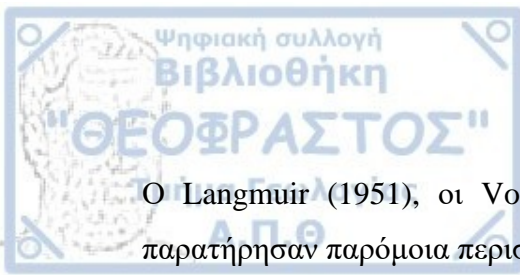
3.2.1.4. Το πρόγραμμα της Ιταλίας.

Το πρόγραμμα της Ιταλίας σχεδιάστηκε για να δοκιμαστεί η δυνατότητα μεταφοράς της ισραηλινής τεχνολογίας σποράς νεφών στη μετεωρολογική, γεωγραφική

και γεωμορφολογική περιοχή της Puglia στη νοτιο-ανατολική Ιταλία. Πραγματοποιήθηκε κατά τα έτη 1988-94, ως μια πλήρης αντιγραφή (black box) της ισραηλινής τεχνολογίας σποράς νεφών. Είχε σχεδιαστεί ως ένα τυχαιοποιημένο crossover πρόγραμμα, με στόχο την αύξηση των βροχοπτώσεων, με δύο εναλλασσόμενες περιοχές στόχου και ελέγχου (Bari και Canosa), με μια ουδέτερη ζώνη μεταξύ τους και δύο επιπλέον παρακαείμενες βοηθητικές περιοχές ελέγχου. Η σπορά γινόταν με την εισαγωγή ιωδιούχου αργύρου στα σύννεφα μέσω αεροσκαφών που πετούσαν κοντά στις βάσεις των νεφών, κατά μήκος προκαθορισμένων διαδρομών, στην προσήνεμη περιοχή του κάθε στόχου-νέφους. Ισραηλινοί επιστήμονες, πιλότοι και αεροσκάφη σποράς συγκεντρώθηκαν για να διασφαλιστεί η δυνατότητα πιστής μεταφοράς της τεχνολογίας σποράς. Η αξιολόγηση του πειράματος της Puglia από τους List et al. (1999) δεν υπέδειξε καμία στατιστικά σημαντική επίδραση της σποράς. Μάλιστα, παρουσιάστηκε μια πιθανή μείωση της τάξης του 8%. Διερευνητικές αναλύσεις έδειξαν ότι τα σύννεφα πάνω από τις περιοχές του Bari και της Canosa μπορεί να ήταν διαφορετικά, και ότι οι περιοχές του Bari έχουν ανταποκριθεί ευνοϊκότερα στη σπορά σε ενδιάμεσες συνθήκες υγρασίας. Χωρίς φυσικές μετρήσεις και μοντελοποίηση να συνοδεύουν το πρόγραμμα σποράς, οι List et al. (1999) δεν μπόρεσαν να αποδείξουν τη φυσική λογική οποιουδήποτε αποτελέσματος από την επίδραση της σποράς. Δεν μπόρεσαν να ελέγξουν αν ο στατικός τρόπος σποράς ήταν εφαρμόσιμος στα σύννεφα της Puglia και να δικαιολογηθεί η μεταφορά της ισραηλινής τεχνολογίας σποράς που χρησιμοποιήθηκε.

3.2.1.5. Το πρόγραμμα της Αυστραλίας

Παρατηρήσεις δυναμικών αποτελεσμάτων μετά από σπορά για παγοποίηση νεφών αναφέρθηκαν για πρώτη φορά από τους Kraus και Squires (1947) στην πειραματική σπορά μεγάλων υπέρψυχρων (supercooled) νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης, με ξηρό πάγο στην Αυστραλία. Ανέφεραν μια περίπτωση στην οποία ένα νέφος cumulus, με ύψος κορυφής 23000 feet (περίπου 7 χιλιόμετρα), έτυχε σποράς με 150 pounds (περίπου 68 κιλά) ξηρού πάγου, οπότε οι κορυφές του αυξήθηκαν στα 40.000 feet (περίπου 12 χιλιόμετρα), μέσα σε 13 λεπτά. Με το πέρασμα σε 5 λεπτών από τη σπορά, το νέφος δημιούργησε μια ηχώ ραντάρ (echo) ανάλογη δυνατής βροχής.



Ο Langmuir (1951), οι Vonnegut και Maynard (1952), και οι Orr et al. (1950), παρατήρησαν παρόμοια περιστατικά ταχείας ανάπτυξης μετά από σπορά.

Ποσοτικές δοκιμές και ανάπτυξη της έννοιας του δυναμικού τρόπου σποράς, ξεκίνησαν το 1963, υπό την αιγίδα των Navy και Environmental Science Services Administration στο Project Stormfury cumulus program (Simpson et al., 1967). Αυτό ακολουθήθηκε από μια σειρά τυχαιοποιημένων πειραμάτων σποράς στη Φλόριντα, το Τέξας, την Κούβα και την Ταϊλάνδη.

3.2.1.6. Το πρόγραμμα της Καραϊβικής

Το καλοκαίρι του 1965 ένα τυχαιοποιημένο πρόγραμμα σποράς νεφών πραγματοποιήθηκε σε απομονωμένα τροπικά σύννεφα πάνω από τον Καραϊβικό Ωκεανό (Simpson et al., 1967). Επιλέχθηκαν συνολικά 23 σύννεφα, 14 από τα οποία έτυχαν σποράς και 9 μελετήθηκαν ως έλεγχοι αναφοράς. Η σπορά πραγματοποιήθηκε από ένα αεροσκάφος που έριξε από 8 έως 16 φυσίγγια ιωδιούχου αργύρου, με το κάθε ένα να απελευθερώνει 1.2 Kgr καπνού ιωδιούχου αργύρου, στην κορυφή του αναπτυσσόμενου νέφους. Το πρόγραμμα σχεδιάστηκε για να δοκιμάσει, την επίδραση της σποράς στην ανάπτυξη νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης και να αξιολογήσει την ικανότητα ενός μονοδιάστατου μοντέλου (με την ονομασία EMB 65) για την πρόβλεψη της. Η ανάπτυξη του νέφους τεκμηριώθηκε με αεροσκάφη, ραντάρ και φωτογραμμετρικές παρατηρήσεις. Δεν έγινε καμία προσπάθεια για να ελεγχθεί η επίδραση της σποράς στην βροχόπτωση κατά τη διάρκεια αυτού του πειράματος. Η ανάλυση του πειράματος έδειξε ότι τα τροποποιημένα σύννεφα αυξήθηκαν σε ύψος 1.6 χιλιόμετρα μετά τη σπορά, συγκριτικά με τα άλλα σύννεφα, με τη διαφορά να είναι σημαντική και σε στατιστικό επίπεδο, κάτι που το μοντέλο προέβλεψε με αξιοσημείωτη ακρίβεια, δηλαδή το μέγεθος της ανάπτυξης και τις συνθήκες που απαιτούνται για να πραγματοποιηθεί.

3.2.1.7. Τα προγράμματα της Φλόριδα

Νότια Φλόριδα 1968 (SF68)

Το πρώτο από τα τέσσερα τυχαιοποιημένα προγράμματα σποράς νεφών με βάση τον δυναμικό τρόπο πραγματοποιήθηκε στη νότια Φλόριδα τον Μάιο του 1968

(Woodley, 1970). Όπως και στο πρόγραμμα της Καραϊβικής, το πρόγραμμα SF68 ήταν ένα πρόγραμμα μεμονωμένων νεφών. Επιλέχθηκαν 19 σύννεφα για σπορά, 14 εκ των οποίων έτυχαν σποράς και 5 χρησιμοποιήθηκαν για έλεγχο. Τα σύννεφα επιλέχθηκαν από μια μη τυχαία βάση, από έναν πεπειραμένο επιστήμονα-ερευνητή που έκρινε ότι πληρούσαν τα κριτήρια ως πειραματικά σύννεφα, παρατηρώντας από τη κάμερα του αεροσκάφους σποράς. Αυτά τα σύννεφα στη συνέχεια εντοπίστηκαν στις εικόνες ραντάρ και αναλύθηκαν μαζί με τα τροποποιημένα σύννεφα. Όλα τα τροποποιημένα νέφη έλαβαν 1 Kgr καπνού ιωδιούχου αργύρου, από 29 φυσίγγια των 50 γραμμαρίων που αφέθηκαν στο σύννεφο από ένα αεροσκάφος που πετούσε περίπου 6.1 χιλιόμετρα πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Ο σκοπός της σποράς ήταν διπλός: να αλλάξει τη δυναμική του νέφους και συγχρόνως να αυξήσει τη βροχόπτωση ως υποπροϊόν της αλλαγής της δυναμικής του νέφους. Ένα αεροσκάφος που πετούσε ακριβώς πάνω από την κορυφή του νέφους, μέτρησε το ύψος των νεφών που επιλέγηκαν τυχαία για σπορά. Διαπιστώθηκε, ότι η μέση διαφορά της ανάπτυξης μεταξύ των τροποποιημένων και των μη τροποποιημένων νεφών ήταν 3,5 χιλιόμετρα. Στη συνέχεια διεξήχθησαν αναλύσεις των εκτιμήσεων των βροχοπτώσεων από το ραντάρ για τα σύννεφα που είχαν τροποποιηθεί, αλλά και από αυτά και δεν είχαν τροποποιηθεί. Η ανάλυση των εκτιμώμενων βροχοπτώσεων από το ραντάρ, 40 λεπτά μετά τη σπορά, έδειξε ότι η μέση βροχόπτωση των τροποποιημένων νεφών ήταν υπερδιπλάσια από αυτή από τα μη τροποποιημένα νέφη.

Νότια Φλόριδα 1970 (SF70)

Το τυχαίοποιημένο πρόγραμμα των μεμονωμένων νεφών του 1968 (SF68) επαναλήφθηκε το 1970 (Simpson and Woodley, 1971). Οι αλλαγές που έγιναν ήταν σε μια προσπάθεια βελτίωσης των λειτουργιών σποράς και της επιλογής νεφών. Επιλέχθηκαν 19 σύννεφα για τροποποίηση, 13 εκ των οποίων έτυχαν σποράς και 6 ήταν οι έλεγχοι. Υπήρχαν επίσης 10 χειριστήρια ραντάρ. Όπως και στο SF68, ένα αεροσκάφος πέταξε ακριβώς πάνω από τα νέφη και μέτρησε το ύψος της κορυφής των νεφών που τυχαία επιλέχθηκαν για σπορά. Διαπιστώθηκε ότι ο μέσος όρος της διαφοράς στην ανάπτυξη μεταξύ των τροποποιημένων και των μη τροποποιημένων νεφών ήταν 1.9 χιλιόμετρα. Και πάλι, πολλές αναλύσεις των εκτιμώμενων βροχοπτώσεων από το ραντάρ πραγματοποιήθηκαν στα τροποποιημένα και στα μη τροποποιημένα σύννεφα. Η ανάλυση των εκτιμώμενων βροχοπτώσεων από το ραντάρ,

40 λεπτά μετά τη σπορά, έδειξε ότι η αναλογία S/NS (Σποράς/Μη Σποράς) της μέσης βροχόπτωσης των τροποποιημένων νεφών, προς τα μη τροποποιημένα, με τα στοιχεία ελέγχου του ραντάρ, ήταν 1,57. Μια παρόμοια ανάλυση των εκτιμώμενων βροχοπτώσεων από το ραντάρ στο σύνολο της διάρκειας ζωής του νέφους μετά τη σπορά, απέδωσε S/NS ίσο με 2,80.

3.2.1.8. Το πρόγραμμα FACE-1

Το πρώτο πρόγραμμα Florida Area Cumulus Experiment (FACE-1) πραγματοποιήθηκε στη νότια Φλόριδα από το 1970 έως το 1976 (Woodley et al., 1982b). Ήταν ένα διερευνητικό πρόγραμμα ενιαίου χώρου, τυχαιοποιημένο, για να διερευνήσει, αν η σπορά νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης, σύμφωνα με τον δυναμικό τρόπο, θα μπορούσε να αυξήσει τη βροχόπτωση σε μια περιοχή. Η σπορά διενεργήθηκε από ένα αεροσκάφος που έριχνε φυσίγγια των 50-70 γραμμαρίων στις κορυφές των νεφών, τα οποία ικανοποιούσαν τόσο τα οπτικά κριτήρια, όσο και τα κριτήρια των μετρήσεων. Οι κύριες μεταβλητές ήταν οι εκτιμήσεις του ραντάρ των βροχοπτώσεων στο συνολικό στόχο (TT) και στον αιωρούμενο στόχο (FT), δηλαδή το πιο έντονα τροποποιημένο μέρος του στόχου. Κατά τη διάρκεια του πειράματος έγινε μια σειρά σημαντικών αλλαγών στο σχεδιασμό, με μερικές να βασίζονται σε οικονομικά κριτήρια και κάποιες ως αποτέλεσμα νέων πληροφοριών.

Υπήρξαν 104 ημέρες πειραματισμού, 53 μέρες σποράς και 51 χωρίς σπορά. Από αυτές οι 29 (14 σποράς και 15 χωρίς) ονομάστηκαν ημέρες Α και οι 75 (39 σποράς και 36 χωρίς) ονομάστηκαν ημέρες Β. Οι ημέρες Β ήταν οι ημέρες κατά τις οποίες τα σύννεφα έλαβαν 60 φυσίγγια ή και περισσότερα, και σύμφωνα με τους Woodley et al. (1982b) συνέθεσαν το σύνολο των δεδομένων στο οποίο εφαρμόζεται καλύτερα το εννοιολογικό μοντέλο FACE. Οι ημέρες Α, ήταν οι ημέρες στις οποίες τα σύννεφα έλαβαν λιγότερα από 60 φυσίγγια, επειδή ο επιστήμονας της πτήσης αποφάσισε ότι τα κριτήρια καταλληλότητας του στόχου δεν πληρούνταν πλήρως. Μια ανάλυση των βροχοπτώσεων 6 ώρες (360 λεπτά) μετά τη σπορά για τις ημέρες Β απέδωσε τιμές SR 1.49 και 1.23 για τις τιμές FT και TT, αντίστοιχα. Για το σύνολο των Α και Β ημερών, η ανάλυση απέδωσε τιμές SR 1.46 και 1.29 για τα FT και TT, αντίστοιχα. Διεξήχθη γραμμική ανάλυση των δεδομένων σε μια προσπάθεια να ληφθούν υπόψη ορισμένες από τις φυσικές μεταβλητές της βροχόπτωσης, και αυτό είχε ως αποτέλεσμα κάπως



μεγαλύτερες εκτιμήσεις του αποτελέσματος της σποράς από την τυχαιοποιημένη ανάλυση.

3.2.1.9. Το πρόγραμμα FACE-2

Το FACE-2 πραγματοποιήθηκε κατά τα καλοκαίρια του 1978, 1979 και 1980 (Woodley et al., 1983). Ενώ το FACE-1 ήταν ένα διερευνητικό πρόγραμμα, το FACE-2 σχεδιάστηκε και διεξήχθη ως επιβεβαιωτικό (confirmatory) πρόγραμμα. Ο στόχος ήταν να επιβεβαιώσει τα κύρια αποτελέσματα σποράς στο FACE-1, σύμφωνα με τις επιβεβαιωτικές προδιαγραφές που δόθηκαν από τους Woodley et al. (1982α), και να αναπαράγει τις κύριες αναλύσεις του FACE-1. Καθορίστηκαν τρία επίπεδα επιβεβαίωσης, με σειρά από το πιο αδύναμο έως το ισχυρότερο, ως ακολούθως:

Το πρώτο και το πιο αδύναμο επίπεδο επιβεβαίωσης: Η προσαρμοσμένη τιμή P (προσαρμοσμένη για πολλαπλότητα των αναλύσεων) για το σύνολο δύο διπλών αναλογιών (double ratio) βροχόπτωσης S/NS για περίοδο από 2 μέχρι 5 ωρών (120-300 λεπτά) μετά τη σπορά, $R_{120-300}$, προς την αναλογία βροχόπτωσης S/NS για την περίοδο 2 ώρες μετά τη σπορά στις B ημέρες, για μία διπλή αναλογία για το FT και για το TT, έχει σημαντική πιθανότητα.

Το δεύτερο και κάπως ισχυρότερο επίπεδο επιβεβαίωσης: Η προσαρμοσμένη τιμή P για το σύνολο των δύο διπλών αναλογιών (double ratio) στο πρώτο επίπεδο επιβεβαίωσης, συν τις δύο μεμονωμένες αναλογίες (single ratio) βροχοπτώσεων S/NS στην περίοδο 6 ώρες (360 λεπτά) μετά τη σπορά R_{360} , τις ημέρες B, η απλή αναλογία για το FT και η αναλογία για το TT, έχει σημαντική πιθανότητα.

Το τρίτο και το ισχυρότερο επίπεδο επιβεβαίωσης: Η προσαρμοσμένη τιμή P για το σύνολο των δύο διπλών αναλογιών (double ratio) και των δυο απλών αναλογιών (single ratio) στο δεύτερο επίπεδο επιβεβαίωσης, συν τις δύο απλές αναλογίες (single ratio) των S/NS βροχοπτώσεων στην περίοδο των 6 ωρών μετά τη σπορά R_{360} , σε ημέρες A + B, μία απλή αναλογία για το FT και μία απλή αναλογία για το TT, έχει ουσιαστική πιθανότητα.

Για να ληφθεί υπόψη η πολλαπλότητα των αναλύσεων, η προσαρμοσμένη τιμή του P για το σύνολο των στατιστικών δοκιμών, σε κάθε επίπεδο επιβεβαίωσης, λήφθηκε, πολλαπλασιάζοντας την ελάχιστη τιμή P, στο σύνολο με τον αριθμό των

στατιστικών δοκιμών στο σετ (2, 4 και 6 στατιστικές δοκιμές για το πρώτο, το δεύτερο και το τρίτο επίπεδο επιβεβαίωσης, αντίστοιχα).

Το FACE-2 απέτυχε να επιβεβαιώσει τα ευρήματα του FACE-1 στο πρώτο και το πιο αδύναμο επίπεδο επιβεβαίωσης από τις τιμές P για τις διπλές αναλογίες (double ratio) FT και TT, ακόμη και πριν να υπολογιστεί η πολλαπλότητα, δηλαδή ήταν 0.78 και 0.81, αντίστοιχα. Αυτό απέκλεισε τη μετάβαση στο επόμενο ισχυρότερο επίπεδο επιβεβαίωσης, σύμφωνα με τις επιβεβαιωτικές προδιαγραφές. Το FACE-2 απέτυχε επίσης να επαναλάβει τις κύριες αναλύσεις του FACE-1. Η ανάλυση των βροχοπτώσεων του FACE-2 στην περίοδο των 6 ωρών μετά τη σπορά R₃₆₀, για τις ημέρες B απέδωσε τιμές SR 1.08 με μονόπλευρη τιμή P ίση με 0.42 και 1.04 με μονόπλευρη τιμή P 0.45 για το FT και το TT, αντίστοιχα. Η ανάλυση των βροχοπτώσεων 6 ώρες μετά τη σπορά R₃₆₀, για τις μέρες A και B σε συνδυασμό, απέδωσε τιμές SR 1.21 με μονόπλευρη τιμή P ίση με 0.30 και 1.03, με μονόπλευρη τιμή P 0.45 για το FT και TT, αντίστοιχα. Η ανάλυση του γραμμικού μοντέλου για τα δεδομένα απέδωσε εξίσου απογοητευτικά αποτελέσματα.

3.2.1.10. Το πρόγραμμα του Τέξας

Το τυχαίο προγραμματισμένο πρόγραμμα σποράς στο Τέξας πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος Southwest Cooperative Program (SWCP), σε μια περιοχή με επίκεντρο το Big Spring, Texas, κατά τα έτη 1986, 1987, 1989, 1990 και 1994 (Rosenfeld and Woodley 1989, 1993, και Woodley and Rosenfeld, 1996). Σχεδιάστηκε για να δοκιμάσει το αποτέλεσμα σποράς με φυσίγγια ιωδιούχου αργύρου σε μέσης κλίμακας νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης. Οι Rosenfeld και Woodley (1993) δήλωσαν πως «είναι το νέφος που λαμβάνει τη σπορά, και οποιοδήποτε αποτέλεσμα της σποράς πρέπει να εκδηλωθεί πρώτα σε αυτό, πριν εκδηλωθεί στο νεφικό σύστημα που περιέχει τα νέφη». Για να αποκτηθεί καλύτερη αναπαράσταση του πλήρους κύκλου ζωής των κυττάρων, συμπεριλαμβανομένων των σταδίων ωρίμανσης και διάλυσης, χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος παρακολούθησης μεγάλης διαδρομής, μαζί με τον αλγόριθμο σύντομης διαδρομής του Rosenfeld (1987). Στην παρακολούθηση μεγάλης διαδρομής, η παρακολούθηση των κυττάρων ήταν συνεχής μέσω όλων των συγχωνεύσεων και διαχωρισμών, και τερματίζεται μόνο αφού προσδιοριστεί ότι το κύτταρο διαλύεται, όπως καθορίζεται από τη σχέση της παρούσας φάσης του με το

ιστορικό του μέγιστο. Οι Rosenfeld και Woodley (1989) έδειξαν, ότι η διαδικασία παρακολούθησης κύτταρων μεγάλης διαδρομής παρήγαγε περιστασιακά κύτταρα με διπλή ιστορία στο τελευταίο τμήμα της ζωής τους, και προειδοποίησε ότι αυτό μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στην εφαρμογή αυστηρών στατιστικών διαδικασιών για τα δεδομένα αυτών των κυττάρων.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος του Τέξας συμπεριλήφθηκαν 38 πειραματικές μονάδες (18 έτυχαν σποράς και 20 μη σποράς). Η ανάλυση μεμονωμένων κυττάρων περιορίστηκε σε 28 πειραματικές μονάδες (13 σποράς και 15 μη σποράς), επειδή η ποιότητα των δεδομένων του ραντάρ το 1986 δεν επέτρεπε αναλύσεις διαδρομής των κυττάρων. Οι 28 πειραματικές μονάδες περιείχαν 213 κύτταρα μεγάλης διαδρομής (99 έτυχαν σποράς και 114 όχι) και 209 κύτταρα μικρής διαδρομής (97 σποράς και 112 μη σποράς). Η αξιολόγηση των πειραματικών δεδομένων του Τέξας (Woodley and Rosenfeld, 1996) περιλάμβανε πολλές αναλύσεις, αποδίδοντας τα ακόλουθα κύρια αποτελέσματα:

- 1) οι τιμές S/NS (SR) για το μέγιστο ύψος των τροποποιημένων κυττάρων μακράς διαδρομής, H_{LTC} και των κυττάρων βραχείας διαδρομής H_{STC} , ήταν 1.10 και 1.00, αντίστοιχα.
- 2) οι τιμές S/NS (SR) για τις εκτιμώμενες βροχοπτώσεις από το ραντάρ, από τα τροποποιημένα κύτταρα μεγάλης διαδρομής R_{LTC} , και τα κύτταρα μικρής διαδρομής R_{STC} , ήταν 2.63 και 1.69, αντίστοιχα, και
- 3) η τιμή S/NS (SR) για την πειραματικά εκτιμώμενη βροχόπτωση από το ραντάρ, 150 λεπτά μετά την επιλογή R_{150} , ήταν 1.45.

3.2.1.11. Τα προγράμματα της Κούβας.

Ένα τυχαίο προγραμματισμένο πρόγραμμα σποράς σε τροπικά νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης πραγματοποιήθηκε στην περιοχή Camaguey της Κούβας από το 1985 έως το 1990 (Koloskov et al., 1996). Ο σκοπός του πειράματος ήταν να εκτιμηθεί η ικανότητα σποράς ψυχρών νεφών με φυσίγγια ιωδιούχου αργύρου για να αυξηθεί η εκτιμώμενη βροχόπτωση από το ραντάρ σε μεμονωμένα νέφη και συστάδες κυττάρων στην Κούβα.

Το πρόγραμμα της Κούβας πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια. Ένα διερευνητικό πρόγραμμα πραγματοποιήθηκε το 1985 προκειμένου να προσδιοριστεί ο τύπος των νεφών που ανταποκρινόταν καλύτερα στη σπορά. Συνολικά μελετήθηκαν 46 σύννεφα,

29 που έτυχαν σποράς και 17 χωρίς σπορά. Η ανάλυση αυτών των δεδομένων έδειξε ότι τα σύννεφα τα οποία ήταν πιο κατάλληλα για σπορά, ήταν οπτικά πυκνά αναπτυσσόμενα σύννεφα, των οποίων οι κορυφές κατά τη στιγμή της σποράς είχαν ανέλθει τουλάχιστον σε ύψος μεταξύ 6 και 8 χιλιομέτρων (αντίστοιχες θερμοκρασίες κορυφής του νέφους μεταξύ -10° και -20°C , αντίστοιχα) και είχαν διαμέτρους κορυφής μεταξύ 2 και 5 χιλιομέτρων. Τα σύννεφα που πληρούσαν αυτά τα κριτήρια και έτυχαν σποράς, παρουσίασαν αύξηση στο ύψος τους, στη διάρκεια ζωής τους, και παρήγαν περισσότερες εκτιμώμενες βροχοπτώσεις από το ραντάρ, από αυτά που δεν έτυχαν σποράς.

Πραγματοποιήθηκε μια επιβεβαιωτική φάση του πειράματος κατά τη διάρκεια του 1986-90 σε μεμονωμένα σύννεφα και σε συστάδες νεφών μεσαίας κλίμακας, τα οποία ονομάστηκαν, προγράμματα Cuba-1 και Cuba-2. Η ανάλυση επικεντρώθηκε στα αποτελέσματα της σποράς στις εκτιμώμενες ιδιότητες του ραντάρ, τόσο στα μεμονωμένα σύννεφα, όσο και στα μεσαίας κλίμακας συμπλέγματα, για το συνολικό δείγμα, και το υποσύνολο των νεφών που κρίθηκαν από το διερευνητικό πρόγραμμα ως κατάλληλα για σπορά, δηλαδή το υποσύνολο με ύψη κορυφής έως και 8.0 χιλιομέτρων κατά τη στιγμή της σποράς. Μια παρόμοια μεθοδολογία παρακολούθησης μικρής σχετικά διαδρομής κυττάρων, αναπτύχθηκε από τον Rosenfeld (1987), για να αντλήσει τις τιμές έξι (6) εκτιμώμενων ιδιοτήτων ραντάρ, συμπεριλαμβανομένου του όγκου βροχής (R), το μέγιστο ύψος (H), τη μέγιστη ανακλαστικότητα (Z), τη μέγιστη περιοχή (AM), τη συνολική περιοχή (AI) και την διάρκεια (T). Έτσι δημιουργήθηκε μια στατιστική αξιολόγηση των διαφορών μεταξύ των μέσων τιμών των τροποποιημένων και των μη τροποποιημένων περιπτώσεων των έξι ιδιοτήτων των νεφών, χρησιμοποιώντας τη δοκιμή των δύο δειγμάτων των Mann και Whitney.

Το πρόγραμμα Cuba-1

Μελετήθηκαν συνολικά 46 μεμονωμένα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης, 24 έτυχαν σποράς και 22 δεν έτυχαν σποράς. Η ανάλυση αυτών των νεφών έδειξε ότι το SR για T, R, H και AI ήταν 1.11, 1.41, 1.04 και 1.31, αντίστοιχα. Η τιμή SR για τα Z και AM ήταν 1.03 και 1.20, αντίστοιχα. Από το συνολικό δείγμα των νεφών, 20 απομονωμένα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης (11 σποράς και 9 μη σποράς), ήταν στην κατηγορία που το εξερευνητικό πρόγραμμα υπόδειξε πως ήταν κατάλληλα για σπορά.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτού του υποσυνόλου νεφών έδειξαν ότι το SR για τα T, R, H, AI, Z και AM ήταν 1.24, 2.22, 1.08, 1.64, 1.05 και 1.38, αντίστοιχα.

Το πρόγραμμα Cuba-2

Συνολικά μελετήθηκαν 82 συστάδες νεφών μεσαίας κλίμακας, 42 έτυχαν σποράς και 40 δεν έτυχαν σποράς. Η ανάλυση αυτών των νεφικών συμπλεγμάτων έδειξε ότι το SR για T, R, H και AI ήταν 1.15, 1.43, 1.08 και 1.19, αντίστοιχα. Η τιμή SR για Z και AM ήταν 1.00 και 1.07, αντίστοιχα. Από το συνολικό δείγμα των νεφών, 42 συστάδες νεφών μεσαίας κλίμακας, 19 σποράς και 23 μη σποράς, ήταν στην κατηγορία που το διερευνητικό πρόγραμμα υπέδειξε πως ήταν κατάλληλες για σπορά. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτού του υποσυνόλου υπέδειξε ότι το SR για T, R, H, AI, Z και AM ήταν 1.21, 1.65, 1.17, 1.33, 1.01 και 1.28, αντίστοιχα.

3.2.1.12. Το πρόγραμμα της Ταϊλάνδης

Ένα τυχαιοποιημένο πρόγραμμα αύξησης βροχής σε ψυχρά νέφη πραγματοποιήθηκε κατά την περίοδο 1994-1998 στην περιοχή Bhumibol στη βορειοδυτική Ταϊλάνδη, με στόχο να προσδιοριστούν οι δυνατότητες αύξησης της βροχόπτωσης, μέσω της σποράς με ιωδιούχο άργυρο στις κορυφές των νεφών, σε μια περιοχή πάνω από 2000 τετραγωνικά χιλιόμετρα (Woodley et al., 1999a). Αυτό το επιβεβαιωτικό πρόγραμμα (confirmatory project), βασίστηκε και υποστηρίχθηκε από τα αποτελέσματα των διερευνητικών (exploratory) πειραμάτων, που πραγματοποιήθηκαν το 1991 και το 1993, τα οποία έδειξαν, ότι η αναλογία της μέσης βροχόπτωσης, από 8 τροποποιημένες πειραματικές μονάδες, προς αυτή από 7 μη τροποποιημένες, 300 λεπτά μετά την εφαρμογή, ήταν 2.73 (Silverman et al., 1994), δείχνοντας έτσι μια αύξηση στη βροχόπτωση λόγω σποράς κατά 173%. Το επιβεβαιωτικό πρόγραμμα διεξήχθη ως ένα τυχαιοποιημένο, εναλλασσόμενο (crossover) στόχου σχεδιασμό, σύμφωνα με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στο πρόγραμμα του Τέξας. Τα τροποποιημένα κύτταρα, αποτελούσαν μονάδες έντονων υπέρψυχρων νεφών, που σχηματίζονταν μέσα στην πειραματική μονάδα, σε έναν κύκλο με ακτίνα 25 χιλιομέτρων με κέντρο τη θέση του νέφους κατακόρυφης ανάπτυξης, που πληροί τις προϋποθέσεις για αρχική τροποποίηση. Η μονάδα κινούταν με τον άνεμο, καθώς το ραντάρ τύπου S-band, σάρωσης 5 λεπτών, συγκέντρωνε δεδομένα για να χρησιμοποιηθούν για την



αξιολόγηση των ιδιοτήτων του κυττάρου και της μονάδας. Οι πειραματικές διαδικασίες για τα προσόντα μονάδας και της τροποποίησης του, καθορίστηκαν εκ των προτέρων (Woodley et al., 1999a, 1999c).

Το πρόγραμμα της Ταϊλάνδης περιλάμβανε 62 πειραματικές μονάδες, 31 έτυχαν σποράς και 31 μη σποράς, που ικανοποιούσαν τα κριτήρια, όπως αυτά καθορίστηκαν στο αρχικό σχέδιο. Η αναλογία εκτιμώμενης βροχόπτωσης ραντάρ, σποράς προς μη σποράς, 5 ώρες (300 λεπτά) μετά την επιλογή μονάδας R_{300} , ήταν 1.48 (Woodley et al., 1999b, 1999c και Woodley and Rosenfeld, 2000). Το πρόγραμμα των 62 μονάδων προερχόταν από 642 κύτταρα μεγάλης διαδρομής (353 σποράς και 289 μη σποράς). Η ανάλυση των δεδομένων έδειξε ότι το SR για τις εκτιμώμενες βροχοπτώσεις από το ραντάρ, για τη ζωή των κυττάρων μεγάλης διαδρομής μετά την επιλογή R_{LTC} , ήταν 1.35.

Οι Woodley et al., (1999b, c) διεξήγαγαν επίσης έναν αριθμό διερευνητικών αναλύσεων, χρησιμοποιώντας όλες τις πειραματικές μονάδες που μελετήθηκαν κατά τη διάρκεια της διερευνητικής και επιβεβαιωτικής φάσης του προγράμματος, προκειμένου να αξιολογηθεί, αν η σπορά είχε κάποια επίδραση στα νέφη και στη βροχόπτωσή τους. Το δείγμα ανάλυσης της εξερευνητικής φάσης αποτελούνταν από 85 πειραματικές μονάδες (43 σποράς και 42 μη σποράς). Περιλάμβανε τις 15 πειραματικές μονάδες (8 σποράς και 7 μη σποράς) που πληρούσαν τις προϋποθέσεις κατά τη διάρκεια της διερευνητικής φάσης του πειράματος, και τις 8 πειραματικές μονάδες (4 σποράς και 4 μη σποράς) που ήταν κατάλληλες κατά τη διάρκεια του πειράματος επιβεβαίωσης, που πληρούσαν τα κριτήρια περιεκτικότητας σε υγρό νερό, όπως αναθεωρήθηκε, όταν το πρόγραμμα ήταν σε εξέλιξη. Η διερευνητική αξιολόγηση του συνολικού όγκου βροχής, στις πειραματικές μονάδες, 300 λεπτά μετά την επιλογή R_{300} , απέδωσε τιμή SR ίση με 1.58, και για 600 λεπτά μετά την επιλογή R_{600} , απέδωσε τιμή SR ίση με 1.91. Αυτά τα αποτελέσματα ήταν αναμφίβολα από τα πολύ ευνοϊκά αποτελέσματα, που δόθηκαν από τις 15 πειραματικές μονάδες, κατά τη διάρκεια της διερευνητικής φάσης του πειράματος, αποτελέσματα που χρησιμοποιήθηκαν για να δικαιολογήσουν τη διεξαγωγή του επιβεβαιωτικού πειράματος. Οι 85 πειραματικές μονάδες αποτελούνται από 850 κύτταρα μεγάλης διαδρομής (461 σποράς και 389 μη σποράς). Η ανάλυση του μέγιστου ύψους του κυττάρου H_{LTC} και της βροχόπτωσης R_{LTC} , ήταν 1.03 και 1.36, αντίστοιχα (Woodley et al., 1999b, Woodley and Rosenfeld, 2000).

3.2.1.13. Το πρόγραμμα των Ηνωμένων Αραβικών Εμιράτων

Το πρόγραμμα σποράς νεφών των Ηνωμένων Αραβικών Εμιράτων διενεργείται από το Εθνικό Κέντρο Μετεωρολογίας (National Center of Meteorology). Η σπορά εκτελείται με εξοπλισμένα αεροσκάφη που αναφλέγουν φωτοβολίδες υγροσκοπικών αλάτων (Χλωριούχο Κάλιο, KCl) στις βάσεις, ως επί το πλείστον, θερμών νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης (Cooper et al., 1997, Buintjes et al., 2012, Cotton et al., 1982) κοντά στον πυρήνα του ανοδικού ρεύματος. Το πρόγραμμα ξεκίνησε το 2002 και η περιοχή εφαρμογής ήταν η οροσειρά Hajar (Reid et al., 2006). Με την πάροδο των ετών το πρόγραμμα αναπτύχθηκε και επεκτάθηκε και σε άλλες περιοχές με την δημιουργία του UAE Research Program for Rain Enhancement Science (UAEREP) το 2015 (Mazroui et al., 2017). Σε μια μελέτη αξιολόγησης των επιπτώσεων της σποράς (Al Hosari et al., 2021) παρουσιάζεται μια στατιστική σύγκριση της καταμετρημένης βροχόπτωσης για μη τροποποιημένα νέφη την περίοδο 1981 – 2002 με δεδομένα που προέκυψαν από εκτιμήσεις ραντάρ σε τροποποιημένα νέφη της περιόδου 2003 – 2019. Επίσης παρουσιάζεται μια σύγκριση για την περίοδο εφαρμογής του προγράμματος σε στόχους εφαρμογής και ελέγχου με την εμφάνιση μια μέσης ετήσιας αύξησης στη βροχόπτωση τη τάξης του 23%. Μια ανάλυση βασισμένη σε ραντάρ για 152 καταιγίδες (87 μη τροποποιημένες και 65 που έτυχαν σποράς) έδειξε ότι μετά την πάροδο 15 έως 25 λεπτών από την χρονική στιγμή της σποράς, οι ιδιότητες της τροποποιημένης καταιγίδας παρουσιάζονται βελτιωμένες. Συγκεκριμένα οι μεγαλύτερες αυξήσεις παρουσιάζονται στον όγκο των καταιγίδων σε ποσοστό 159%, στην επιφάνεια των καταιγίδων σε ποσοστό 72% και στη διάρκεια ζωής τους σε ποσοστό 65%. Το ύψος των τροποποιημένων νεφών παρουσίασε μια μέση αύξηση της τάξης του 9% ενώ μικρότερες είναι και οι αντίστοιχες αυξήσεις που παρουσιάζονται την μέγιστη και μέση ανακλαστικότητα, σε ποσοστά 4% και 3% αντίστοιχα. Τα ενθαρρυντικά αυτά αποτελέσματα έδωσαν ανάπτυξη στο πρόγραμμα αύξησης βροχής και το UAEREP λειτουργεί ένα πρόγραμμα υποτροφιών δε επιλεγμένους ερευνητές με στόχο την εξέλιξη της τροποποίησης του καιρού για την αύξηση της βροχόπτωσης (www.uaerep.ae).

3.3. Συνθετική κριτική ανασκόπηση - Επιμέρους συμπεράσματα

Όλα τα προγράμματα δυναμικού τρόπου σποράς μπορούν να θεωρηθούν ως προγράμματα "black box". Όλα τους βασίστηκαν κυρίως σε ιδιότητες που προέρχονται από ραντάρ των μελετημένων ιδιοτήτων των νεφών. Κανένα από τα στατιστικά προγράμματα δε συνοδεύονταν από συστηματικές μετρήσεις των βασικών συνδέσμων στην αλυσίδα των φυσικών γεγονότων, που συνδέεται με το εννοιολογικό μοντέλο δυναμικού τρόπου σποράς, όπως απαιτείται, για να διαπιστωθεί η φυσική πιθανότητα. Έγιναν φυσικές μετρήσεις, ωστόσο αποτελούνταν από μικρά δείγματα που ελήφθησαν υπό συνθήκες υψηλή μεταβλητότητα από σύννεφο σε σύννεφο. Σύμφωνα με τους Woodley and Rosenfeld (2000), πολλές από τις φυσικές μετρήσεις δεν έγιναν μέσα στα σύννεφα που επιλέγηκαν τυχαία για σπορά κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Μάλιστα, ισχυρίστηκαν, ότι τα αποτελέσματα των υποστηρικτικών φυσικών μελετών ήταν συναφή και συνεπή με το δυναμικό εννοιολογικό μοντέλο σποράς ψυχρών νεφών, όπως διατυπώθηκε εκείνη την περίοδο από τους Rosenfeld et al., (1999).

Η φυσική υποστήριξη για το εννοιολογικό μοντέλο δυναμικού τρόπου σποράς προέρχεται από μελέτες όπως

- 1) τη μικροφυσική μελέτη από Sax et al., (1979), που έδειξε ότι τα σύννεφα που είχαν τροποποιηθεί με ιωδιούχο άργυρο περιείχαν περισσότερο πάγο από τα αντίστοιχα μη τροποποιημένα,
- 2) τη θεωρητική μελέτη των Lamb et al., (1981), που έδειξε ότι ο δυναμικός τρόπος σποράς λειτουργεί καλύτερα σε σύννεφα που περιέχουν σταγόνες βροχής,
- 3) τις μελέτες ραντάρ από τους Gagin et al., (1985) και Gagin et al., (1986), που διευκρίνισαν τη σχέση μεταξύ του μέγιστου ύψους των νεφών και του όγκου βροχής, που παράγεται από μεμονωμένα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης, και έδειξε ότι η αύξηση του ύψους των νεφών, σχεδόν διπλασιάζει την ποσότητα βροχής,
- 4) τη μελέτη ραντάρ από Rosenfeld και Woodley (1993), που υποστήριξε ότι τα τροποποιημένα κύτταρα συγχωνεύονται με γειτονικά κύτταρα, πιο συχνά από ότι τα μη τροποποιημένα,
- 5) τις διερευνητικές αναλύσεις των Woodley και Rosenfeld (1996), που υποστήριξαν ότι τα εμφανή αποτελέσματα της σποράς, ήταν μεγαλύτερα σε σύννεφα με θερμοκρασίες βάσης μεγαλύτερης των 15°C, το οποίο αποδίδεται σε μεγαλύτερη

- πιθανότητα, ότι οι σταγόνες βροχής θα ήταν παρούσες σε έντονα ανοδικά ρεύματα, πάνω από το επίπεδο παγοποίησης, λόγω της πιο έντονης διαδικασίας συμπύκνωσης και σύγκρουσης και συνεννόησης (collision – coalescence process),
- 6) τη μικροφυσική μελέτη των Rosenfeld και Woodley (1997), που υποστήριξαν ότι η αρχική απόκριση του νέφους στο δυναμικό τρόπο σποράς είναι μεγαλύτερη στα σύννεφα που περιέχουν υπέρψυχρες σταγόνες βροχής,
 - 7) τις μικροφυσικές μελέτες από τους Sudhikoses et al. (1998) και Rosenfeld et al. (1999), που έδειξαν ότι η περιεκτικότητα σε υπέρψυχρο νερό εξαντλείται γρηγορότερα σε τροποποιημένα σύννεφα από ότι σε μη τροποποιημένα σύννεφα και
 - 8) τη μικροφυσική μελέτη των Woodley και Rosenfeld (2000), που υποστήριξε ότι η σπορά, έχει ως αποτέλεσμα, την παραγωγή πάγου σε περιοχές ενεργοποίησης ανοδικών ρευμάτων, και την επακόλουθη μείωση στο νερό του νέφους.

Τα πειράματα αριθμητικών μοντέλων σποράς ψυχρών νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης με πυρήνες πάγου, σύμφωνα με τους Reisen et al., (1996) έδειξαν από την άλλη, ότι η αποτελεσματικότητα της σποράς ήταν μεγαλύτερη στα μεγάλα ηπειρωτικά σύννεφα, στα οποία η διαδικασία σύγκρουσης και συνένωσης έπαιζε μικρό ρόλο και έτσι μειώθηκε περισσότερο, καθώς τα σύννεφα έγιναν λιγότερο ηπειρωτικά, και οριακά θαλάσσια σε χαρακτήρα, σύννεφα.

Τα προγράμματα στατικού και δυναμικού τρόπου σποράς που έχουν πραγματοποιηθεί, έτυχαν πολλών στατιστικών και φυσικών αναλύσεων από διάφορους ερευνητές. Μια συγκεντρωτική ανάλυση πολλών από αυτών έγινε από τον Silverman (2001), τα αποτελέσματα των στατιστικών αυτών αναλύσεων και φυσικών μελετών συνοψίζονται παρακάτω, ύστερα από μια εκ των υστέρων κριτική αναθεώρηση και ανασκόπηση, αυτών:

3.3.1. Για τα προγράμματα Στατικού τρόπου Σποράς

Σύμφωνα με το εκ των προτέρων έγγραφο σχεδιασμού για το πρόγραμμα Israel-2, το πρόγραμμα αποτελούνταν από μια βόρεια περιοχή που επρόκειτο να τροποποιηθεί τυχαία, μια νότια περιοχή που επρόκειτο να τροποποιηθεί επίσης τυχαία με εναλλακτικό τρόπο με τη βόρεια περιοχή, μια ουδέτερη ζώνη μεταξύ των δύο περιοχών



Η ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙΡΟΥ ΓΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΒΡΟΧΗΣ

και μια περιοχή ελέγχου βόρεια της βόρειας περιοχής. Υποβλήθηκαν δύο υποθέσεις για δοκιμή:

- 1) η σπορά θα ενίσχυε τις βροχοπτώσεις στη βόρεια περιοχή, όταν θα αξιολογείται ως περιοχή ελέγχου, και
- 2) η σπορά θα ενίσχυε την βροχόπτωση στη βόρεια και τη νότια περιοχή, όταν θα αξιολογείται ως πρόγραμμα εναλλαγής (crossover).

Παρόλο που ο σχεδιασμός του προγράμματος είχε έμφαση στη βόρεια περιοχή επειδή περιλάμβανε τη λίμνη Kinneret, που ήταν σημαντική για τους υδάτινους πόρους του Ισραήλ, και έθεσε κάποιες επιφυλάξεις σχετικά με το όφελος της σποράς στη νότια περιοχή, προσδιορίστηκαν και οι δύο υποθέσεις στο τελικό σχέδιο. Αυτό οδηγεί στα ακόλουθα σημαντικά αποτελέσματα:

- 1) Η σπορά στο πρόγραμμα Israel-1 είχε ως αποτέλεσμα αύξηση στη βροχής κατά 15% για το συνδυασμό των περιοχών.
- 2) Τα αποτελέσματα του προγράμματος Israel-1 δεν επαναλήφθηκαν στο πρόγραμμα Israel-2.
- 3) Το πρόγραμμα μονού στόχου (single target) του Israel-2 για τη βόρεια περιοχή είχε ως αποτέλεσμα αύξηση 13% στη βροχή
- 4) Το πρόγραμμα σποράς Israel-3 δεν κατέληξε σε σημαντική αλλαγή στη βροχή στη νότια περιοχή.

Δορυφορικές μετρήσεις και επιτόπου φυσικές μετρήσεις στα νέφη από αεροσκάφη, δείχνουν ότι υπάρχει μεγάλη μεταβλητότητα στη δομή των νεφών πάνω από το Ισραήλ. Οι Levin et al., (1996) και οι Rosenfeld και Lensky (1998) παρατήρησαν στοιχεία της διαδικασίας συμπύκνωσης και συνένωσης και της διαδικασίας πολλαπλασιασμού των παγοκρυστάλλων σε ορισμένα σύννεφα, συνθήκες που δεν συνάδουν με τα φυσικά κριτήρια για την εφαρμογή του στατικού τρόπου σποράς. Κάποια σύννεφα βρέθηκαν να έχουν σχετικά μακράς διάρκειας επεισόδια υπέρψυχρου νερού, με λίγα στοιχεία της διαδικασίας συμπύκνωσης και συνένωσης (Lahav et al., 1998 και Rosenfeld and Lensky, 1998), συνθήκες που είναι σύμφωνες με τα φυσικά κριτήρια για την εφαρμογή του στατικού τρόπου σποράς. Η μεταβλητότητα

στη μικροδομή των Ισραηλινών νεφών, περιπλέκεται περαιτέρω από την εισαγωγή σκόνης της ερήμου, κυρίως στη νότια περιοχή, και σε μικρότερο βαθμό στη βόρεια, σύμφωνα με τους Rosenfeld και Farbstein, (1992), που δείχνει ότι σύννεφα που επηρεάζονται από τη σκόνη να είναι ακατάλληλα για σπορά με ιωδιούχο άργυρο με τον στατικό τρόπο. Έτσι οι υποτιθέμενες συνθήκες για σπορά στατικού τρόπου, που σχημάτισε τη φυσική βάση των Ισραηλινών πειραμάτων, δεν ήταν έγκυρες για ένα αριθμό νεφών που τροποποιήθηκαν στα ισραηλινά πειράματα. Το πόσο μεγάλο είναι το ποσοστό, δεν μπορεί να προσδιοριστεί, αφού δεν υπήρχαν φυσικές μετρήσεις που να συνοδεύουν τις διαδικασίες σποράς. Ο Rosenfeld (1997), ο Woodley (1997) και οι Dennis and Orville (1997) πρότειναν εναλλακτικές φυσικές υποθέσεις (crossover design) για να μπορέσουν δυνητικά να εξηγήσουν τα θετικά αποτελέσματα της σποράς στη βόρεια περιοχή, οι οποίες προτάθηκαν από τις στατιστικές αναλύσεις των πειραμάτων Israel-1 και Israel-2, ωστόσο, δεδομένου ότι δεν υπήρχαν ταυτόχρονες φυσικές μετρήσεις, δεν υπάρχει τρόπος να αξιολογηθούν οι φυσικές τους πιθανότητες.

3.3.2. Για τα προγράμματα Δυναμικού τρόπου Σποράς

Το πρόγραμμα της Καραϊβικής επικεντρώθηκε σε μεμονωμένα τροπικά νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης, και κατάφερε να δείξει με ισχυρή στατιστική σημαντικότητα, ότι η σπορά με ιωδιούχο άργυρο αύξησε την κατακόρυφη ανάπτυξή τους, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, και ότι το μοντέλο EMB 65 προέβλεψε, με αξιοσημείωτη ακρίβεια, το μέγεθος της ανάπτυξης τους και τις συνθήκες που απαιτούνται γι' αυτό. Τα δύο προγράμματα SF68 και SF70 επικεντρώθηκαν επίσης σε μεμονωμένα σύννεφα, αλλά επέκτειναν την εκτίμησή τους στα αποτελέσματα του δυναμικού τρόπου σποράς στην αύξηση της βροχόπτωσης, καθώς και στην αύξηση της κατακόρυφης ανάπτυξης των νεφών. Και τα δύο προγράμματα επανέλαβαν επιτυχώς τα αποτελέσματα του πειράματος της Καραϊβικής, σε σχέση με την αύξηση που προκαλείται από τη σπορά στην κατακόρυφη ανάπτυξη των νεφών.

Επαρκώς ενθαρρυσμένα από τα αποτελέσματα της βροχόπτωσης από τα προγράμματα SF68 και SF70, το πρόγραμμα FACE-1 ξεκίνησε για να δοκιμάσει το δυναμικό τρόπο σποράς για την αύξηση της βροχής, σε πρόγραμμα πολλαπλών νεφών, σε μια σταθερή περιοχή στη νότια Φλόριντα. Λόγω των πολλών σημαντικών αλλαγών

στο σχεδιασμό κατά τη διάρκεια του πειράματος, και τις πολλαπλές αναλύσεις, το FACE-1 θεωρήθηκε να είναι ένα εξερευνητικό (exploratory) πρόγραμμα (Woodley et al., 1982b), και όλα τα αποτελέσματα είναι προϊόντα διερευνητικών αναλύσεων. Η φύση των αποτελεσμάτων, αλλά και η συνοχή τους από τις διάφορες αναλύσεις, προκάλεσε τη διεξαγωγή του πειράματος FACE-2, που σχεδιάστηκε για να επιβεβαιώσει τα αποτελέσματα αύξησης της βροχής στο FACE-1, και για να επαναλάβει τις κύριες αναλύσεις του FACE-1. Το αποτέλεσμα ήταν, ότι το FACE-2 απέτυχε να επιβεβαιώσει τα ευρήματα των FACE-1, και απέτυχε επίσης να επαναλάβει τις κύριες αναλύσεις του FACE-1.

Οι Gagrin et al., (1986) διεξήγαγαν μια διερευνητική μελέτη για τις ιδιότητες νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης για ορισμένα τροποποιημένα σύννεφα του FACE-2 σε μερικές ημέρες Β. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Rosenfeld (1987) για να οριστούν και να παρακολουθηθούν τα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης, κατά τη διάρκεια της ζωής τους, δηλαδή έως ότου εμφανιστεί διαχωρισμός ή συγχώνευση αυτών. Ανέλυσαν δεδομένα σχετικά με το ύψος, την ένταση και την έκταση της βροχόπτωσης, τη διάρκεια, και το συνολικό όγκο βροχής από τα νέφη, τα οποία χρησιμοποιούσαν για να εκτιμηθεί η επίδραση της σποράς, σε αυτές τις παραμέτρους. Συγκεκριμένα, προσπάθησαν να επαληθεύσουν την αύξηση στην έκταση των νεφών, η οποία θεωρήθηκε ότι ήταν το βασικό στοιχείο της σποράς, που στοχεύει στην παραγωγή δυναμικών αιτιών, με τις αντίστοιχες αυξήσεις στις άλλες παραμέτρους των βροχοφόρων νεφών. Οι Gagrin et al., (1986) πρότειναν ότι η σπορά νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης για δυναμικά αίτια, αύξησε θετικά τις συνολικές βροχοπτώσεις τους, επηρεάζοντας τις άλλες παραμέτρους τους, και ότι οι θετικές αλλαγές στις παραμέτρους τους θα μπορούσαν να προβλεφθούν από τις αλλαγές στο μέγιστο ύψος των νεφών μετά τη σπορά. Η επίδραση της σποράς φάνηκε να είναι μεγαλύτερη στα νέφη που υποβλήθηκαν σε σπορά νωρίς στον κύκλο ζωής τους, με 600 g ιωδιούχου αργύρου, ή περισσότερα.

Το πρόγραμμα του Τέξας, σχεδιάστηκε, διεξήχθη και αναλύθηκε σύμφωνα με το εννοιολογικό μοντέλο δυναμικού τρόπου σποράς, που καθοδήγησε τα προγράμματα FACE. Ενόψει αυτού, και της σημασίας ότι οι επιπτώσεις της σποράς θα ήταν αρχικά εμφανείς στην κλίμακα νεφών όπως φαίνεται από τις διερευνητικές αναλύσεις του



Η ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙΡΟΥ ΓΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΒΡΟΧΗΣ

FACE-2 των Gagin et al., (1986), τουλάχιστον τρεις μηδενικές υποθέσεις ήταν έμμεσες στο σχεδιασμό:

- 1) η σπορά δεν αυξάνει το μέγιστο ύψος των τροποποιημένων νεφών μικρής διαδρομής,
- 2) η σπορά δεν αυξάνει τη βροχόπτωση από την τροποποίηση νεφών μικρής διαδρομής,
- 3) η σπορά δεν αυξάνει τη βροχόπτωση από επεξεργασμένες πειραματικές μονάδες.

Η έννοια των κυττάρων μεγάλης διαδρομής αναλύθηκε για πρώτη φορά από τα δεδομένα του πειράματος του Τέξας, οπότε η αξιολόγηση των κυττάρων μεγάλης διαδρομής πρέπει να θεωρείται διερευνητική, και τα αποτελέσματά της πρέπει να λαμβάνονται με προσοχή, επειδή τα μεγάλης διαδρομής κύτταρα, περιστασιακά παρήγαγαν άλλα κύτταρα με διπλή ιστορία στο τελευταίο τμήμα της ζωής τους. Η αξιολόγηση των πειραματικών δεδομένων του Τέξας (Rosenfeld and Woodley, 1993 και Woodley and Rosenfeld, 1996) έδειξε ότι καμία από τις τρεις μηδενικές υποθέσεις δεν θα μπορούσε να απορριφτεί, στο κατάλληλο επίπεδο σημαντικότητας. Τα ευρήματα των διερευνητικών αναλύσεων των κυττάρων μικρής διαδρομής από τους Gagin et al., (1986), δεν επαναλήφθηκαν από το πρόγραμμα του Τέξας.

Τα προγράμματα της Κούβας επίσης σχεδιάστηκαν, διεξήχθησαν και αναλύθηκαν σύμφωνα με το εννοιολογικό μοντέλο δυναμικού τρόπου σποράς, που καθοδήγησε τα προγράμματα στη νότια Φλόριντα και τα προγράμματα FACE. Μια αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της σποράς έγινε για έξι ιδιότητες εκτιμημένες από ραντάρ, νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης (Cuba-1), και για συστάδες νεφών μέσης κλίμακας (Cuba-2). Εάν το υποσύνολο των νεφών, που το εξερευνητικό πρόγραμμα έδειξε ως κατάλληλο για σπορά, δηλαδή το υποσύνολο με κορυφές ύψους μεταξύ 6.5 και 8.0 χιλιομέτρων κατά τη στιγμή της σποράς, ερμηνεύεται πως αντιπροσωπεύει τις μηδενικές υποθέσεις που προορίζονται από το επιβεβαιωτικό πρόγραμμα, τότε το κατάλληλο επίπεδο σημασίας για το SR της κάθε μιας από τις έξι ιδιότητες είναι 0,0083. Σε αυτή τη βάση, οι τιμές SR, για όλες τις ιδιότητες για τα μεμονωμένα σύννεφα (Cuba-1), και για τις συστάδες σύννεφων μέσης κλίμακας (Cuba-2), δεν ήταν στατιστικά σημαντικές.

Η αξιολόγηση του πειράματος της Ταϊλάνδης, σύμφωνα με τον προσχεδιασμό του, δεν απέδωσε στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα. Δεν υπήρξε στατιστικά

σημαντική αλλαγή στον εκτιμώμενο όγκο βροχής, είτε των νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης, είτε των πειραματικών μονάδων. Μια εξέταση των δεδομένων του πειράματος ψυχρών νεφών της Ταϊλάνδης από τους Woodley et al., (1999c), έδειξε ότι η τυχαιοποίηση παρήγαγε μια "κακή επιλογή", κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας χαρακτηρισμού μονάδας, έτσι ώστε ο όγκος βροχής των τροποποιημένων πειραματικών μονάδων πριν από την επιλογή, να είναι σημαντικά μεγαλύτερος από αυτόν, των μη τροποποιημένων. Εάν ληφθεί υπόψη αυτή η μεταβλητή, τότε είναι πιθανό ότι τα ήδη μη σημαντικά αποτελέσματα, θα αποδυναμωθούν ακόμη περισσότερο.

Το δυναμικό εννοιολογικό μοντέλο σποράς ψυχρών νεφών εξελίχθηκε με την πάροδο του χρόνου. Στην αρχή, βασίστηκε στην υπόθεση ότι ένα τροποποιημένο σύννεφο, μπορεί να παράγει παρόμοια ύψη βροχής, όπως ένα μη τροποποιημένο σύννεφο του ίδιου ύψους, και ότι η ποσότητα βροχής αυξάνεται, αυξάνοντας την έκταση του νέφους. Θεωρήθηκε ότι η σπορά του υπέρψυχρου τμήματος του νέφους θα παγώσει το νερό, από την απελευθέρωση λανθάνουσας θερμότητας, έτσι θα προέκυπτε αύξηση της άνωσης του τροποποιημένου όγκου του νέφους, αναγκάζοντάς το να αναπτυχθεί ψηλότερα, και ότι το νέφος θα παρήγαγε περισσότερη βροχή από ένα μη τροποποιημένο, ως αποτέλεσμα της αύξησης της έκτασής του. Τα προγράμματα της Καραϊβικής και της νότιας Φλόριντα επιβεβαίωσαν, ότι η σπορά προκάλεσε τα σύννεφα να αναπτυχθούν ψηλότερα, αλλά δεν παρείχαν τα απαιτούμενα στατιστικά στοιχεία που θα οδηγούσαν στην παραγωγή περισσότερης βροχής.

Στο τέλος του πειράματος FACE-1, διαμορφώθηκε μια λεπτομερής δήλωση του εννοιολογικού μοντέλου δυναμικού τρόπου σποράς ψυχρών νεφών (Woodley et al. 1982b), που αναφέρεται ως μοντέλο 1. Καθόρισε τους βασικούς συνδέσμους στην αλυσίδα φυσικών διεργασιών, από τη σπορά των αρχικών αναπτύξεων του νέφους μέχρι την αύξηση της βροχόπτωσης της περιοχής. Επεξεργάστηκε, αλλά δεν μετέβαλε τις βασικές προϋποθέσεις του δυναμικού τρόπου σποράς ψυχρών νεφών, που βασίζονται τα προηγούμενα προγράμματα. Η σπορά υποτίθεται ότι προκαλούσε ταχεία παγοποίηση του υπερψυγμένου νερού (SLWC) στο ανοδικό ρεύμα, την απελευθέρωση λανθάνουσας θερμότητας που θα ενίσχυε το ανοδικό ρεύμα, και θα προκαλούσε την αύξηση της κατακόρυφης ανάπτυξης των νεφών. Η πίεση πέφτει κάτω από τα αναπτυσσόμενα νέφη λόγω της επιτάχυνσης, και η θέρμανση στα ανώτερα επίπεδα στη

συνέχεια θα οδηγούσε στην αύξηση της εισροής στα μεσαία και χαμηλά επίπεδα, τροφοδοτώντας έτσι το αρχικό στάδιο ανάπτυξης του νέφους. Αυτές οι διαδικασίες θα οδηγούσαν τελικά σε αυξημένη βροχόπτωση και ενισχυμένα καθοδικά ρεύματα (Simpson 1980) από τα τροποποιημένα σύννεφα.

Η ενισχυμένη σύγκλιση από τα καθοδικά ρεύματα και της γενικής ροής στην περιοχή, λειτουργεί ως έναρξη περισσότερων αναπτύξεων, από τα οποία θα παραχθεί περισσότερη βροχόπτωση. Όταν η σπορά εφαρμόζεται σε αναπτύξεις οι οποίες είναι κοντά σε γειτονικές αναπτύξεις, τότε ευνοείται και η συγχώνευση των κυττάρων μεταξύ τους. Η ενισχυμένη σύγκλιση και οι συγχωνεύσεις κυττάρων, οδηγούν σε επέκταση του νεφικού συστήματος, και στη μετατροπή του σε ένα πλήρως ανεπτυγμένο καταιγιδοφόρο σύστημα. Το καθαρό αποτέλεσμα είναι η αυξημένη βροχόπτωση στην περιοχή.

Συνοψίζοντας, το εννοιολογικό μοντέλο δυναμικού τρόπου σποράς ψυχρών νεφών, έτυχε αμφισβήτησης. Τρισδιάστατες προσομοιώσεις μοντέλων που εξαρτώνται από το χρόνο, δεν μπόρεσαν να δείξουν ότι τα αποτελέσματα της απελευθέρωσης λανθάνουσας θερμότητας στα μέσα επίπεδα, μεταφέρθηκαν σε χαμηλότερα επίπεδα μέσω μεταβολών στην πίεση (βασικός σύνδεσμος στη διατυπωμένη αλυσίδα φυσικών διεργασιών), που στη συνέχεια θα τροποποιούσε σημαντικά την κυκλοφορία του νέφους (Levy and Cotton, 1984). Τότε, αντίθετα στις υποθέσεις του εννοιολογικού μοντέλου δυναμικού τρόπου σποράς ψυχρών νεφών, τα αποτελέσματα των πειραμάτων του Τέξας έδειξαν, ότι η σπορά, δεν αύξησε το ύψος των νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης, και πως τα τροποποιημένα σύννεφα απέδωσαν περισσότερη βροχόπτωση από τα μη τροποποιημένα σύννεφα, του ίδιου ύψος. Αυτό προκάλεσε επανεξέταση και τροποποίηση του εννοιολογικού μοντέλου 1, και τη δημιουργία του εννοιολογικού μοντέλου δυναμικής σποράς ψυχρών νεφών του μοντέλου 2 (Rosenfeld and Woodley, 1993).

Σύμφωνα με το εννοιολογικό μοντέλο 2, η σπορά υποτίθεται ότι παράγει ταχεία παραγωγή του SLWC στο ανοδικό ρεύμα, με ψύξη των μεγαλύτερων σταγόνων, ώστε να μπορούν να συνενωθούν με το υπόλοιπο νερό του νέφους και να σχηματίσουν μαλακό χαλάζι (graupel). Το graupel, που προκαλείται από τη σπορά, θεωρείται ότι μεγαλώνει πολύ πιο γρήγορα από τις σταγόνες βροχής της ίδιας μάζας, έτσι ώστε ένα

μεγαλύτερο μέρος του νερού του νέφους να μετατραπεί σε βροχόπτωση πριν χαθεί από άλλες διαδικασίες. Ο πολλαπλασιασμός του πάγου (ice multiplication mechanism), δεν θεωρείται ως ένας σημαντικός παράγοντας μέχρι το μεγαλύτερο μέρος του νερού στο νέφος να έχει μετατραπεί σε βροχόπτωση. Αυτή η ταχύτερη μετατροπή του νερού σε κατακρήμνιση πάγου, ενισχύει την απελευθέρωση λανθάνουσας θερμότητας, αυξάνει την άνωση και ενισχύει το ανοδικό ρεύμα, που βοηθά τα αναπτυσσόμενα σωματίδια πάγου, που παράγονται από τη σπορά και, αν και όχι απαραίτητα, ωθούν σε επιπλέον ανάπτυξη του νέφους. Έτσι, η βασική αρχή του δυναμικού τρόπου σποράς, ως προς το εννοιολογικό μοντέλο 1, απορρίφθηκε, δηλαδή η σπορά νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης αύξησε τη συνολική βροχόπτωση τους ως αποτέλεσμα της αύξησης της έκτασης τους (Gagin et al., 1986). Απεναντίας θεωρήθηκε στο εννοιολογικό μοντέλο 2, ότι η διατήρηση της μάζα του νερού στα ανώτερα τμήματα του νέφους, που προκαλείται από την αναζωογόνηση του ανοδικού ρεύματος, προκαλεί την καθυστέρηση της δημιουργίας του καθοδικού ρεύματος από τον σχηματισμό της βροχόπτωσης. Αυτή η καθυστέρηση δίνει περισσότερο χρόνο στο ανοδικό ρεύμα να τροφοδοτήσει με επιπλέον υγρασία το αναπτυσσόμενο νέφος, αυξάνοντας έτσι το μέγεθος των κατακρημνισμάτων. Αυτές οι διαδικασίες οδηγούν τελικά σε αυξημένη βροχόπτωση και ενισχυμένα καθοδικά ρεύματα από τα τροποποιημένα σύννεφα, που οδηγούν σε περισσότερη σύγκλιση, περισσότερες συγχωνεύσεις νεφών, μετατροπή του νεφικού συστήματος σε ένα πλήρως καταγιδοφόρο σύστημα, και σε μια καθαρή αύξηση των βροχοπτώσεων στην περιοχή στόχου, όπως ενδείκνυται από το εννοιολογικό μοντέλο 1.

Το δυναμικό εννοιολογικό μοντέλο σποράς ψυχρών νεφών 2 δοκιμάστηκε στο πρόγραμμα της Ταϊλάνδης. Μπορεί να θεωρηθεί ως απόπειρα επανάληψης και επέκτασης των διερευνητικών αποτελεσμάτων του πειράματος του Τέξας, και επιβεβαίωσης του αναθεωρημένου εννοιολογικού μοντέλου που αναπτύχθηκε από τις διερευνητικές αναλύσεις του Τέξας. Μια στατιστικά σημαντική αλλαγή στον εκτιμώμενο από ραντάρ όγκο βροχής, ωστόσο, δεν ενδείκνυται ούτε για τα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης, ούτε για τις πειραματικές μονάδες. Σε αντίθεση με τα αξιώματα του εννοιολογικού μοντέλου 2, διαπιστώθηκε, ότι τα άμεσα τροποποιημένα σύννεφα δεν παρουσιάζουν τα προβλεπόμενα αποτελέσματα της σποράς, δεν υπήρχε στατιστικά σημαντική αύξηση των βροχοπτώσεων, και η βροχόπτωση, και πιθανώς το

ενισχυμένο καθοδικό ρεύμα που παράγεται από αυτήν, δεν φαίνεται να καθυστερεί (Woodley et al., 1999c). Μια άλλη εμφανής ασυνέπεια με το εννοιολογικό μοντέλο σποράς, εμφανής στα αποτελέσματα των Woodley et al., (1999c), ήταν η ισχυρή ένδειξη ότι η μέση μέγιστη ανακλαστικότητα του ραντάρ από τα τροποποιημένα νέφη ήταν μικρότερη από αυτή από τα μη τροποποιημένα, ένα αποτέλεσμα που φαίνεται να έρχεται σε αντίθεση με τις ισχυρές ενδείξεις, ότι η μέση μέγιστη ανακλαστικότητα του ραντάρ από τα τροποποιημένα νέφη ήταν μεγαλύτερη από αυτήν από τα μη τροποποιημένα. Η διερευνητική ανάλυση από τους Woodley et al., (1999c), έδειξε επίσης ότι η διαφορά στον μέσο όγκο βροχής, μεταξύ των περιπτώσεων S και NS, δεν εκδηλώθηκε μέχρι περίπου 2 ώρες μετά τη σπορά του νέφους, ή λίγο μετά τον μέσο χρόνο τερματισμού της σποράς. Η διαφορά στο μέσο όρο του όγκου βροχής αυξήθηκε σταθερά με το χρόνο, φθάνοντας στο μέγιστο περίπου 8 ώρες μετά την πειραματική πιστοποίηση της μονάδας, ή περίπου 6 ώρες μετά το μέσο όρο τερματισμού σποράς. Αν υποθεθεί ότι η σπορά ήταν όντως υπεύθυνη για τα προαναφερθέντα αποτελέσματα, θα χρειαστεί μια ακόμη αναθεώρηση του δυναμικού εννοιολογικού μοντέλου σποράς ψυχρών νεφών για να τα αιτιολογήσει.

Η αντικατάσταση του εννοιολογικού μοντέλου σποράς 1 από το εννοιολογικό μοντέλο σποράς 2, ξεκίνησε από το εύρημα στο πρόγραμμα του Τέξας, ότι η σπορά δεν αύξησε το ύψος των νεφών, και την εισήγηση ότι τα τροποποιημένα σύννεφα παρήγαγαν περισσότερες βροχοπτώσεις από τα μη τροποποιημένα σύννεφα του ίδιου ύψους. Ένα παρόμοιο συμπέρασμα προτάθηκε από τα αποτελέσματα του πειράματος της Ταϊλάνδης. Με βάση την εξέταση της επίδρασης της σποράς σε εκτιμώμενο από ραντάρ ύψος κορυφής νέφους, για ένα υποσύνολο νεφών του Τέξας και της Ταϊλάνδης, που θεωρήθηκαν να είναι καταλληλότερα για επέμβαση σύμφωνα με το εννοιολογικό μοντέλο σποράς 2, οι Woodley και Rosenfeld (2000) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η σύνδεση στο εννοιολογικό μοντέλο 1 για την αυξημένη ανάπτυξη των νεφών μετά τη σπορά, θα πρέπει να διατηρηθεί στο εννοιολογικό μοντέλο 2 ως πιθανή, αλλά όχι μια απαραίτητη ενίσχυση του ανοδικού ρεύματος. Τα ύψη των νεφών στην Καραϊβική και τη Φλόριντα, τα οποία έδειξαν ότι η σπορά παρήγαγε σημαντικές αυξήσεις, μετρήθηκαν οπτικά από ένα αεροσκάφος που πετούσε πάνω από την κορυφή του σύννεφου. Στο Τέξας και την Ταϊλάνδη, από την άλλη πλευρά, οι εκτιμήσεις για το ύψος των νεφών έγιναν χρησιμοποιώντας ραντάρ 5 cm και 10 cm (C και S band),

αντίστοιχα, σε κατώφλι ανακλαστικότητας 12 dBz. Επομένως οι οπτικές κορυφές των νεφών στο Τέξας και την Ταϊλάνδη υποτιμήθηκαν σε σχέση με εκείνες στην Καραϊβική και τη Φλόριντα. Συμπέραναν, ότι το ύψος των τροποποιημένων νεφών στο Τέξας και την Ταϊλάνδη υποτιμήθηκαν περισσότερο από τα μη τροποποιημένα σύννεφα, γιατί η σπορά θεωρείται ότι αλλάζει τη μικροφυσική δομή των νεφών με τέτοιο τρόπο, ώστε να προκαλέσει την πτώση της ανακλαστικότητας αυτών των νεφών γρηγορότερα, με ύψος πάνω από το επίπεδο παγοποίησης. Έτσι η διαφορά στο πραγματικό ύψος μεταξύ των τροποποιημένων και των μη τροποποιημένων νεφών, μπορεί να είναι μεγαλύτερη από τη διαφορά στα εκτιμώμενα ύψη από το ραντάρ, και ότι αυτή η διαφορά μπορεί και να είναι στατιστικά σημαντική. Είναι σημαντικό να επιλυθεί αυτή η αβεβαιότητα, γιατί θα βοηθήσει να εξηγηθεί μια μεγάλη ασυνέπεια στα αποτελέσματα, από τα διάφορα προγράμματα δυναμικού τρόπου, δηλαδή τα διαφορετικά αποτελέσματα της σποράς στο ύψος των νεφών. Θα μπορούσε επίσης να παρέχει τα πιο αξιόπιστα στοιχεία μέχρι σήμερα, δηλαδή, ότι η σπορά πραγματικά ενίσχυσε τον ανοδικό ρεύμα, έναν ουσιαστικό σύνδεσμο στην αλυσίδα φυσικών διεργασιών που διατυπώθηκε από το εννοιολογικό μοντέλο σποράς.

ΨΗΦΙΑΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ

Η ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙΡΟΥ ΓΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΒΡΟΧΗΣ



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΔΕΚΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ PDSI ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ

4.1. Το φαινόμενο της ξηρασίας

Σύμφωνα με τον WMO, ως ξηρασία ορίζεται μια εκτεταμένη περίοδος, που μπορεί να παρουσιαστεί οπουδήποτε στον κόσμο, και επηρεάζεται από την απουσία βροχοπτώσεων. Οι πιο γνωστοί προσδιορισμοί της ξηρασίας είναι:

1. **Μετεωρολογική ξηρασία**, η οποία είναι η μείωση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο, σημαντικά κάτω από το μέσο όρο, ή λιγότερο από μία κρίσιμη τιμή, η οποία καθορίζει την έναρξη της ξηρασίας (Da Cunha, 1983).
2. **Υδρολογική ξηρασία** χαρακτηρίζεται μία περίοδος κατά την οποία η παροχή νερού είναι μικρότερη από την ελάχιστη που απαιτείται για την ικανοποίηση των αναγκών μιας περιοχής (Burnash and Ferral, 1973)
3. **Γεωργική ξηρασία**, που προσδιορίζεται από τη μη κανονική ανάπτυξη των καλλιεργειών, ως συνέπεια της περιορισμένης διαθεσιμότητας νερού, λόγω περιορισμένου υετού (Palmer, 1965).

Για τη μελέτη του φαινομένου της ξηρασίας χρειάζεται να αναλυθεί η επίγεια φάση του κύκλου του νερού, όπου λαμβάνουν χώρα διάφορες διεργασίες, όπως η αποθήκευση, η απορροή και η εξάτμιση (Μαχαίρας 2002). Η αποθήκευση του νερού εξαρτάται από την ένταση του υετού, από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και από το ρυθμό διήθησης. Ανάλογα με το έδαφος, όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση του υετού, η διήθηση ελαττώνεται. Απορροή παρατηρείται όταν το έδαφος είναι κορεσμένο σε νερό



και ο ρυθμός βροχόπτωσης είναι μεγάλος, ή τα χαρακτηριστικά του εδάφους είναι τέτοια, που δεν επιτρέπουν την άμεση κατακράτηση του νερού. Η εξάτμιση είναι η διεργασία κατά την οποία πραγματοποιείται άμεση μετάβαση του νερού από την υγρή στην αέρια φάση με φυσικές διαδικασίες. Όταν η μετατροπή του νερού από την υγρή στην αέρια φάση πραγματοποιείται από βιολογικούς οργανισμούς ονομάζεται διαπνοή. Για το λόγο αυτό, η μετάβαση του νερού από υγρή σε αέρια κατάσταση, είτε από φυσικές, ή από βιολογικές διεργασίες, ονομάζεται εξατμισοδιαπνοή. Η εξατμισοδιαπνοή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η σχετική υγρασία του αέρα, η ένταση του ανέμου, η διαθέσιμη ποσότητα νερού προς εξάτμιση κ.α.

Η εκτίμηση της ξηρασίας σε μια περιοχή γίνεται με την χρήση δεικτών οι οποίοι υπολογίζουν το ισοζύγιο της προσθήκης νερού από την βροχόπτωση και των απωλειών του από τις φυσικές διεργασίες.

4.2. Η επιλογή του δείκτη

Για τις ανάγκες αυτής της μελέτης κρίθηκε σωστή η χρήση ενός δείκτη ξηρασίας. Σε μια δημοσίευση από τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (Handbook of Drought Indicators and Indices), γίνεται μια ανάλυση όλων αρκετών αναγνωρισμένων δεικτών ξηρασίας, μεταξύ των οποίων ο SPI (Standardized Precipitation Index), ο DAI (Drought Area Index), ο SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index), ο RDI (Reclamation Drought Index) και άλλοι. Αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του καθενός, παράλληλα με την ευκολία στη χρήση τους και τα δεδομένα που απαιτούνται για τον υπολογισμό τους.

Ο δείκτης που επιλέγηκε στο πλαίσιο αυτής της διατριβής είναι ο Palmer Drought Severity Index, (PDSI), που αναπτύχθηκε από τον Wayne C. Palmer, και τα αποτελέσματά του δημοσιεύτηκαν στην εργασία Meteorological Drought το 1965. Ήταν από τους πρώτους δείκτες που δημιουργήθηκε για τον προσδιορισμό της ξηρασίας, χρησιμοποιώντας περισσότερα δεδομένα, εκτός του νετού. Ο Palmer ανέλαβε την ανάπτυξη μιας μεθόδου ενσωμάτωσης δεδομένων θερμοκρασίας και νετού, με δεδομένα ισοζυγίου ύδατος, για τον προσδιορισμό της ξηρασίας στις καλλιεργήσιμες περιοχές των Ηνωμένων Πολιτειών. Για πολλά χρόνια ο PDSI ήταν ο

μόνος εφαρμοσμένος δείκτης ξηρασίας, και παρόλο που αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1960, εξακολουθεί ακόμα και σήμερα να είναι πολύ δημοφιλής σε όλο τον κόσμο.

Υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μηνιαία δεδομένα θερμοκρασίας και νετού παράλληλα με πληροφορίες της εδαφικής ικανότητας συγκράτησης νερού (available water capacity). Λαμβάνει υπόψη την υγρασία που δημιουργείται από κατακρημνίσματα, καθώς και την υγρασία που αποθηκεύεται στο έδαφος, υπολογίζοντας την πιθανή απώλεια υγρασίας λόγω της επίδρασης της θερμοκρασίας.

Στα πλεονεκτήματα του δείκτη είναι ότι έχει χρησιμοποιηθεί σε όλο τον κόσμο και μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων του μεταξύ των περιοχών υπολογισμού. Επίσης ο κώδικας του είναι εύκολα διαθέσιμος. Ιδιαίτερα όμως η χρήση των δεδομένων του εδάφους (AWC) και του ισοζυγίου του νερού τον καθιστά αρκετά αξιόπιστο για τον προσδιορισμό της ξηρασίας.

Στα μειονεκτήματα είναι, πως η ανάγκη για πλήρες αρχείο δεδομένων μπορεί να προκαλέσει προβλήματα. Το αρχείο πρέπει να είναι πλήρες και ολοκληρωμένο, ενώ οποιαδήποτε έλλειψη στοιχείων μπορεί να μην οδηγήσει σε εντοπισμό μιας γρήγορα εμφανιζόμενης περιόδου ξηρασίας. Επίσης ο PDSI δεν ανταποκρίνεται καλά σε παγωμένη βροχόπτωση ή σε παγωμένα εδάφη.

Με βάση τα παραπάνω, ο PDSI θεωρήθηκε, μεταξύ άλλων δεικτών, ως η καλύτερη επιλογή και υπολογίστηκε για έξι (6) μετεωρολογικούς σταθμούς, τρεις ορεινούς, δύο παραθαλάσσιους και ένα στο εσωτερικό του νησιού.





Σχήμα 4.1: Ορογραφικός χάρτης της Κύπρου. Τα κόκκινα σημεία υποδηλώνουν τη θέση των σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του δείκτη PDSI (source: www.mapsof.net/cyprus/cyprus-topo)

Όπως προαναφέρθηκε, για τον υπολογισμό του δείκτη χρειάζονται δεδομένα βροχόπτωσης, θερμοκρασίας και εδάφους. Τα δεδομένα εδάφους περιγράφονται από την παράμετρο AWC (Available Water Capacity), η οποία είναι συνάρτηση διαφόρων παραμέτρων όπως του σημείου μαρασμού, της ποσότητας του νερού στο έδαφος μετά την αποστράγγιση και της σύστασης του εδάφους. Την χρονική περίοδο εκπόνησης της διατριβής, δεν είχαν γίνει ακριβείς υπολογισμοί του AWC για τις περιοχές ενδιαφέροντος, και αναγκαστικά χρησιμοποιήθηκαν τιμές από τη διεθνή βιβλιογραφία, που παραχωρήθηκε από το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης.

Το έδαφος χωρίζεται σε 12 κατηγορίες μηχανικής ανάλυσης, οι οποίες κατανέμονται σε τρεις ομάδες. Αυτές είναι: τα αμμώδη ή ελαφρά, τα πηλώδη ή μέσης μηχανικής σύστασης και τα αργιλώδη ή βαρετά. Σύμφωνα με το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης, το έδαφος στους έξι σταθμούς που επιλέγηκαν χαρακτηρίζεται σύμφωνα με τη μηχανική του σύσταση ως ακολούθως:

Χαρακτηρισμός των εδαφών των σταθμών:

Αθαλάσσα:	Μέσης Μηχανικής Σύστασης, Αργιλλοπηλώδη, Αμμοπηλώδη
Λάρνακα (αεροδρόμιο):	Αμμώδη, Αλκαλικά εδάφη
Πόλις Χρυσοχόος:	Μέσης Μηχανικής Σύστασης, Πηλώδη έως Αργιλλοπηλώδη
Σταυρός της Ψώκας:	Μέσης έως Βαριάς Μηχανικής Σύστασης, Αργιλλοπηλώδη έως Αργιλώδη
Σαϊτάς:	Γενικά Αμμώδη (έως και 70% άμμο)
Πρόδρομος:	Γενικά Αμμώδη (έως και 70% άμμο)

Η πιο πάνω κατηγοριοποίηση αντιστοιχεί, με βάση τη βιβλιογραφία, σε ένα εύρος τιμών AWC που είναι: για τα αμμώδη 25-100 mm/m, για τα μέσης σύστασης 100-175 mm/m και για τα βαριά 175-250 mm/m. Έγινε υπολογισμός του δείκτη ξηρασίας και για τις δυο ακραίες τιμές του εύρους και τα αποτελέσματα έδειξαν μια διαφορά της τάξης δεύτερου δεκαδικού. Ως εκ τούτου αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή του εύρους για κάθε μηχανική σύσταση.

Η κατηγοριοποίηση των φάσεων της ξηρασίας έγινε από τον Palmer για την περιοχή και την περίοδο που κατασκευάστηκε ο δείκτης PDSI. Δεν είναι σίγουρο αν αυτή η διαβάθμιση ισχύει και για την περιοχή της Κύπρου, αλλά λόγω της μη ύπαρξης κάποιας προσαρμοσμένης διαβάθμισης, αποφασίστηκε να υιοθετηθεί και για τις ανάγκες του υπολογισμού του PDSI για την Κύπρο, χωρίς να μεταβληθεί. Στον Πίνακα 4.1 αναγράφεται η κατάταξη των φάσεων της ξηρασίας από τον Palmer, βάση του Δείκτη PDSI.

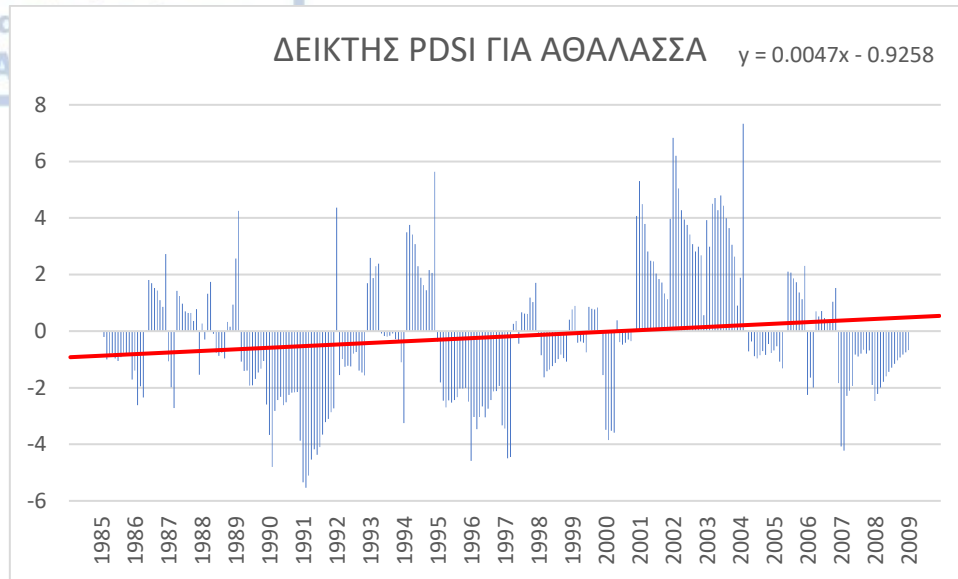
Πίνακας 4.1: Κατάταξη της έντασης της ξηρασίας, βάση του Δείκτη PDSI, σύμφωνα με τον Palmer.

Palmer Classifications	
Τιμές δείκτη	Περιγραφή Περιόδου
4.00 or more	Extremely Wet - Εξαιρετική υγρασία
3.00 to 3.99	Very Wet – Έντονη υγρασία
2.00 to 2.99	Moderately Wet - Μέτρια υγρασία
1.00 to 1.99	Slightly Wet - Ελαφρά υγρασία
0.50 to 0.99	Incipient Wet spell - Τάση προς υγρασία
0.49 to -0.49	Near Normal - Κανονική
-0.50 to -0.99	Incipient Dry spell – Τάση προς ξηρασία
-1.00 to -1.99	Mild Drought - Ελαφρά ξηρασία
-2.00 to -2.99	Moderate Drought - Μέτρια ξηρασία
-3.00 to -3.99	Severe Drought - Έντονη ξηρασία
-4.00 or less	Extreme drought – Εξαιρετική ξηρασία

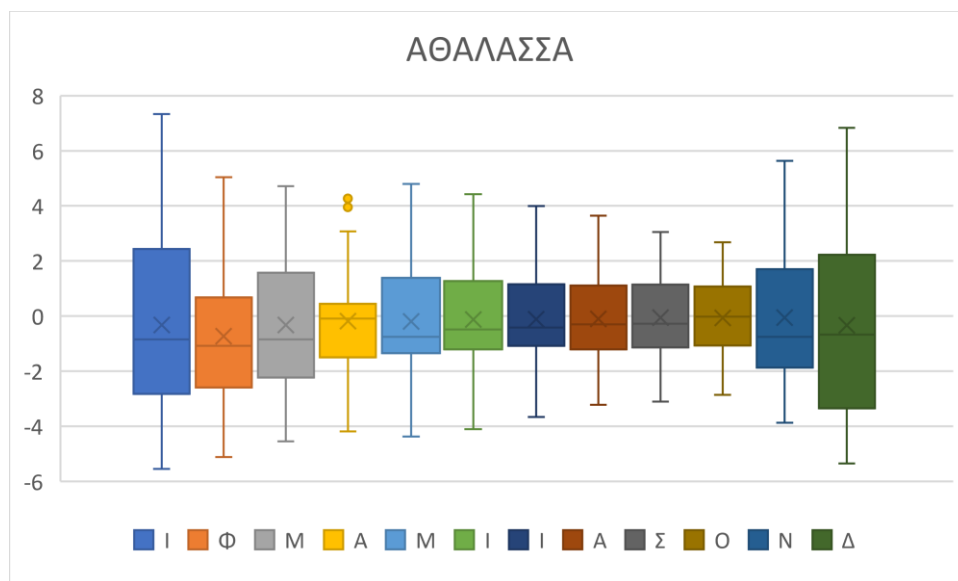
4.3. Ο δείκτης PDSI για την Κύπρο

Στα επόμενα διαγράμματα απεικονίζονται τα αποτελέσματα του PDSI, όπως αυτά υπολογίστηκαν, για τον κάθε ένα από τους έξι (6) σταθμούς της Κύπρου.

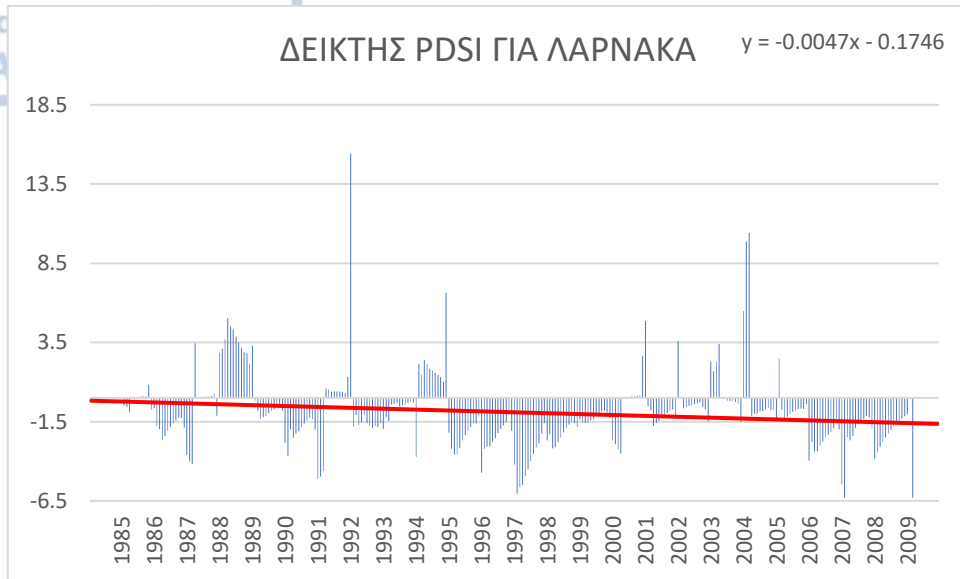
ΔΕΙΚΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ PDSI ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ



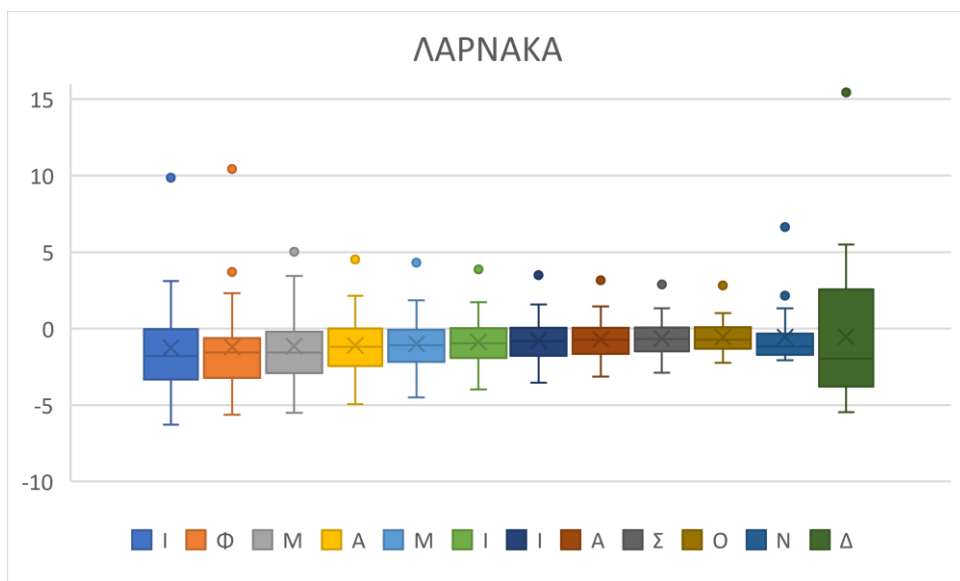
Σχήμα 4.2: Συνολική εικόνα του δείκτη για το σταθμό της Αθαλάσσης.



Σχήμα 4.3: Θηκόγραμμα των μηνιαίων τιμών του Δείκτη PDSI για το σταθμό της Αθαλάσσης.

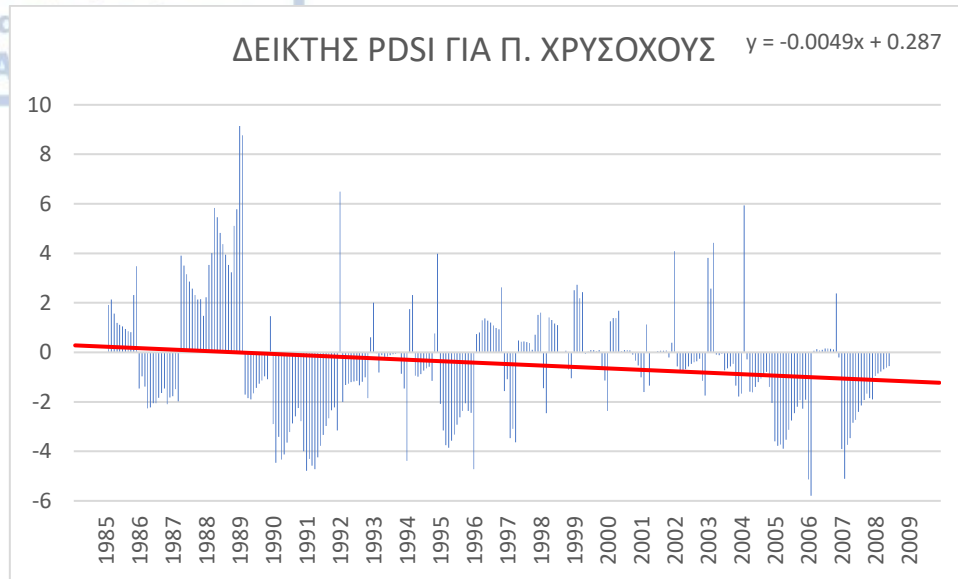


Σχήμα 4.4: Συνολική εικόνα του δείκτη για το σταθμό της Λάρνακας.

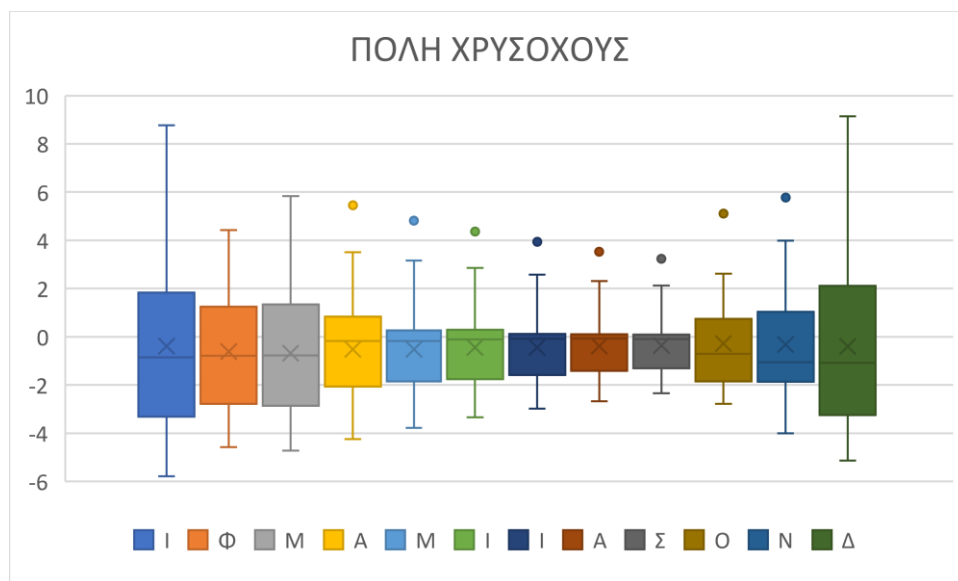


Σχήμα 4.5: Θηκόγραμμα των μηνιαίων τιμών του Δείκτη PDSI για το σταθμό της Λάρνακας.

ΔΕΙΚΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ PDSI ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ



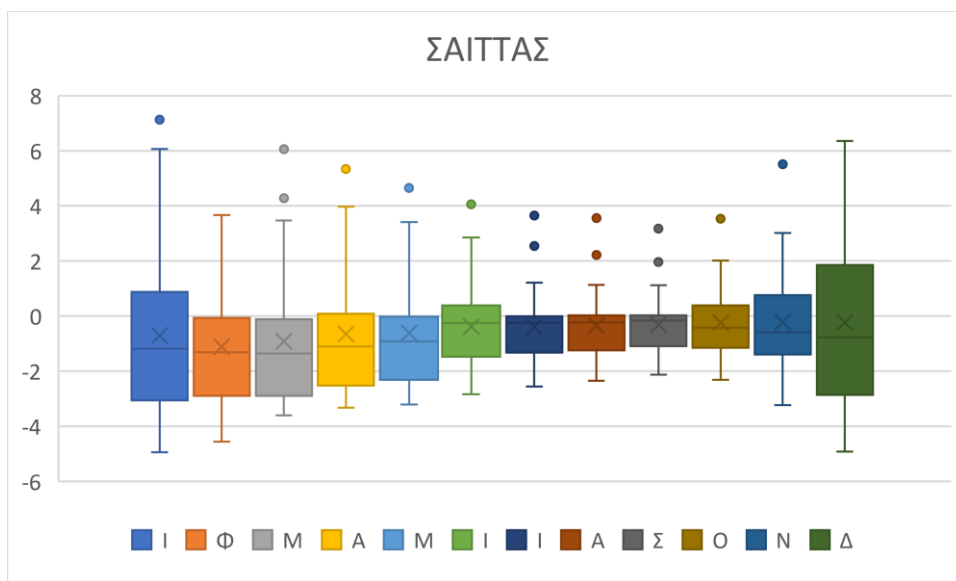
Σχήμα 4.6: Συνολική εικόνα του δείκτη για το σταθμό Πόλης Χρυσοχούς.



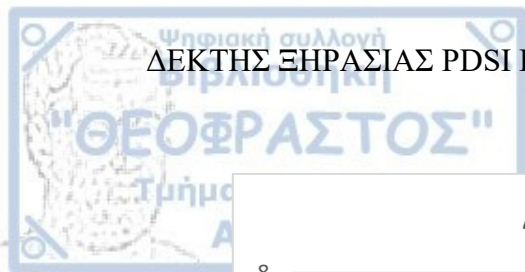
Σχήμα 4.7: Θηκόγραμμα των μηνιαίων τιμών του Δείκτη PDSI για το σταθμό της Πόλης Χρυσοχούς.



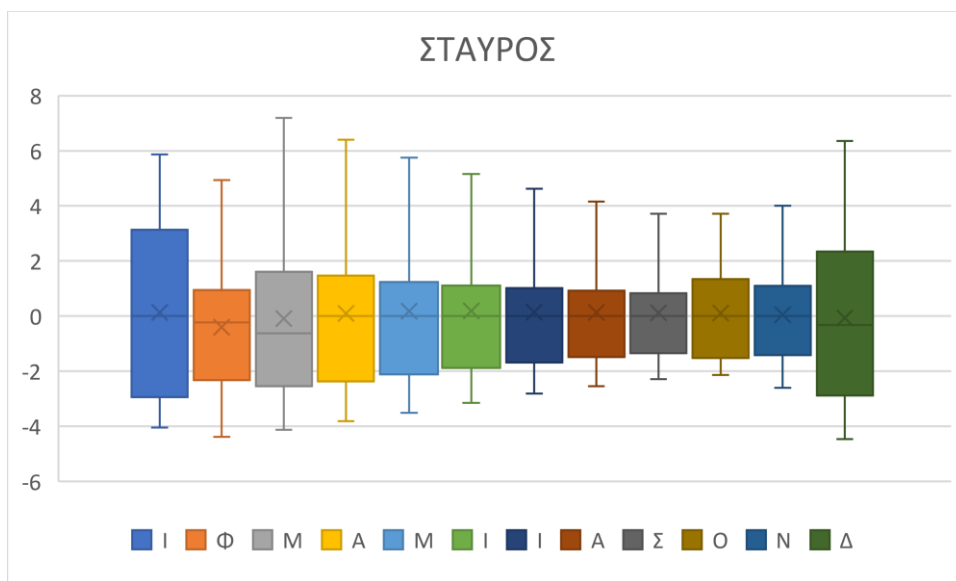
Σχήμα 4.8: Συνολική εικόνα του δείκτη για το σταθμό Σαΐτα.



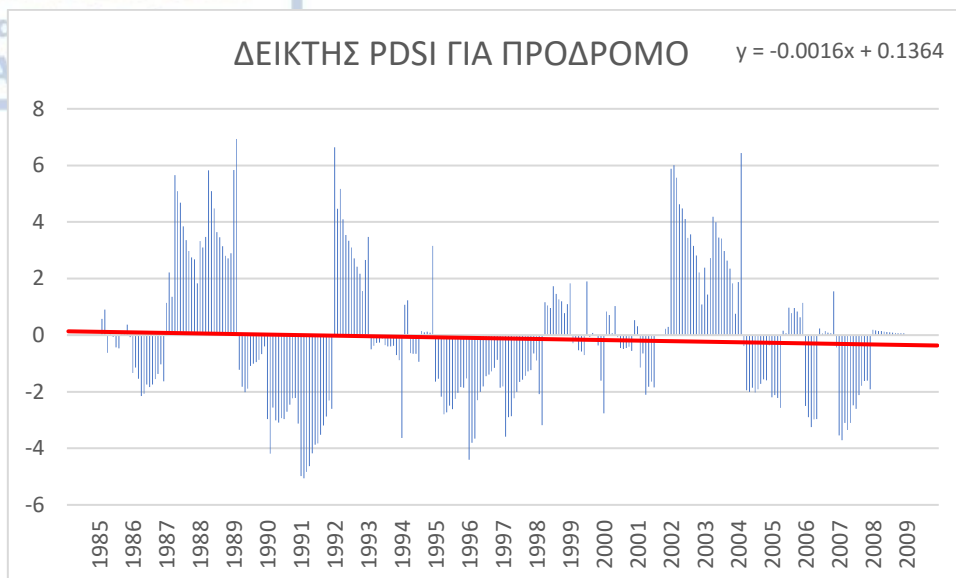
Σχήμα 4.9: Θηκόγραμμα των μηνιαίων τιμών του Δείκτη PDSI για το σταθμό του Σαΐτα.



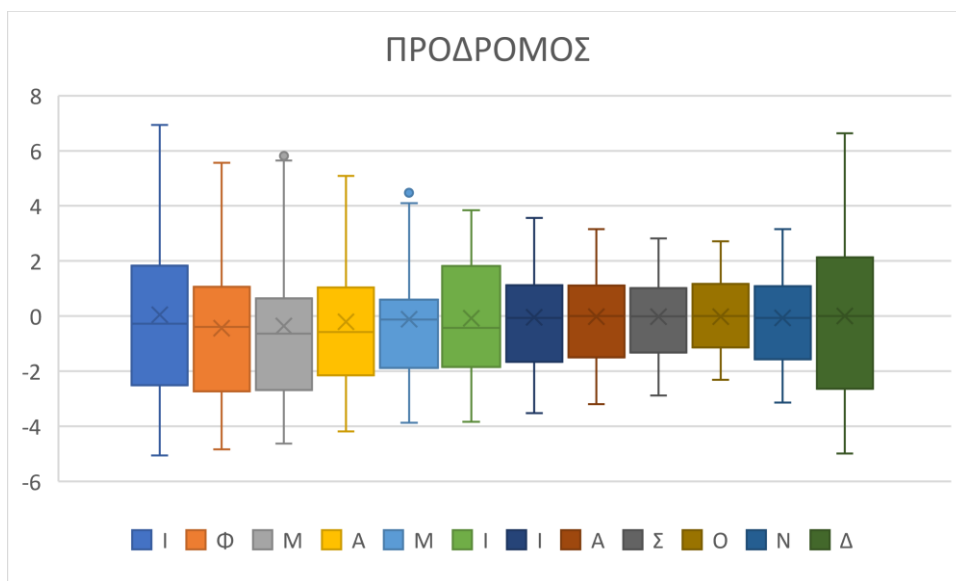
Σχήμα 4.10: Συνολική εικόνα του δείκτη για το σταθμό Σταυρός της Ψώκας.



Σχήμα 4.11: Θηκόγραμμα των μηνιαίων τιμών του Δείκτη PDSI για το σταθμό του Σταυρού της Ψώκας.



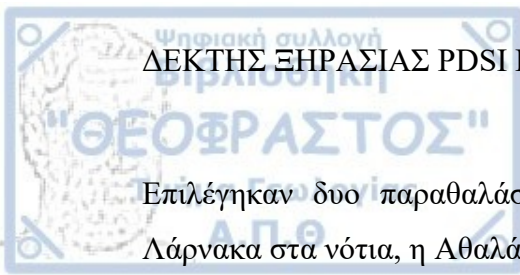
Σχήμα 4.12: Συνολική εικόνα του δείκτη για το σταθμό Προδρόμου.



Σχήμα 4.13: Θηκόγραμμα των μηνιαίων τιμών του Δείκτη PDSI για το σταθμό του Προδρόμου.

4.4. Επιμέρους συμπεράσματα

Υπολογίστηκε ο δείκτης PDSI για 6 μετεωρολογικούς σταθμούς της Κύπρου, με στόχο να αναλυθεί, όσο καλύτερα γίνεται, η εικόνα της ξηρασίας για όλο το νησί.



ΔΕΙΚΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ PDSI ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ

Επιλέγησαν δυο παραθαλάσσιοι σταθμοί, η Πόλη Χρυσοχούς στα βόρεια και η Λάρνακα στα νότια, η Αθαλάσσα στο εσωτερικό, και τρεις ορεινοί, ο Σαϊτάς, ο Σταυρός της Ψώκας, και ο Πρόδρομος, με υψόμετρα 640, 780 και 1380 μέτρα, αντίστοιχα.

Η γενική εικόνα για τον κάθε σταθμό δείχνει μία τάση προς ξηρότερες καταστάσεις, με εξαίρεση το σταθμό της Αθαλάσσας στο εσωτερικό, όπου υπάρχει μια τάση προς ουδέτερες, ή ελαφρώς πιο υγρές καταστάσεις. Οι σταθμοί Λάρνακας, Πόλης Χρυσοχούς και Σαϊτά δείχνουν μεγαλύτερη κλίση προς ξηρότερες καταστάσεις με τους σταθμούς του Σταυρού της Ψώκας και του Προδρόμου να τείνουν προς ουδέτερες ή ελαφρώς ξηρότερες καταστάσεις.

Από τα θηκογράμματα (whisker box plots) φαίνεται πως για τους σταθμούς Αθαλάσσας, Λάρνακας, Πόλης Χρυσοχούς και Σαϊτά φαίνεται πως η μέση μηνιαία τιμή καθώς και η διάμεσος τιμή είναι αρνητική, ιδιαίτερα για τους χειμερινούς μήνες. Αυτό παρουσιάζεται ακόμα και για τον σταθμό της Αθαλάσσας, ο οποίος είναι και ο μόνος με μοναδική τάση προς ελαφρώς πιο υγρές καταστάσεις. Για τους σταθμούς του Σταυρού της Ψώκας και του Προδρόμου η μέση και η διάμεσος τιμή είναι πολύ κοντά στο μηδέν, εκτός από μερικές εξαιρέσεις, κάτι που είναι σε συμφωνία με την ουδέτερη τάση προς ξηρότερες καταστάσεις.

Η εικόνα από τους δυο παραλιακούς σταθμούς, Πόλης Χρυσοχούς και Λάρνακας είναι παρόμοια, με την εμφάνιση σχεδόν της ίδιας τάσης, παρόλο που βρίσκονται σχεδόν μεσημβρινά - αντιδιαμετρικά στο νησί. Για τις ορεινές περιοχές η εικόνα είναι πιο ανάμεικτη. Στον σταθμό του Σαϊτά (νότια του Τροόδους) εμφανίζεται η πιο έντονη τάση προς ξηρότερες καταστάσεις, με αυτή του Προδρόμου (κορυφή του Τροόδους) να είναι και αυτή προς ξηρότερες καταστάσεις αλλά πιο ήπια, ενώ αυτή του Σταυρού της Ψώκας (βορειοδυτικά του Τροόδους) εμφανίζεται σχεδόν ουδέτερη. Στο συγκεκριμένο σταθμό παρουσιάζονται και οι περισσότερες μέσες μηνιαίες θετικές τιμές, κάτι που δικαιολογείται μερικώς από την τοποθεσία του σταθμού και τις μέσες ποσότητες βροχόπτωσης που δέχεται. Για τους άλλους δυο ορεινούς σταθμούς οι πλείστες μέσες μηνιαίες και διάμεσες τιμές είναι αρνητικές.

Από την ανάλυση της μακροχρόνιας τάσης του δείκτη PDSI, υπολογίστηκε το μοντέλο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης (simple linear regression model) με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (ordinary least squares method) και έγινε ο έλεγχος της στατιστικής σημαντικότητας του μοντέλου για τον κάθε μετεωρολογικό σταθμό. Η

στάθμη σημαντικότητας παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα, σχεδόν σε όλους τους σταθμούς, με εξαίρεση αυτόν του Σταυρού της Ψώκας. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Υπολογισμός της μακροχρόνιας τάσης του δείκτη PDSI και εκτίμηση της στατιστικής σημαντικότητας του μοντέλου για κάθε μετεωρολογικό σταθμό.

Μετεωρολογικοί Σταθμοί	Σημαντικότητα (p-value)
Αθαλάσσας	0,001
Λάρνακας	0,014
Πόλης Χρυσοχούς	0,002
Προδρόμου	0,032
Σαϊττά	0,002
Σταυρού της Ψώκας	0,551

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός, πως σε όλους τους σταθμούς, οι τρεις μεγαλύτερες αρνητικές μηνιαίες τιμές παρουσιάζονται την περίοδο Δεκέμβριο – Μάρτιο, η οποία είναι η περίοδος με τις περισσότερες βροχές σε ένα υδρομετεωρολογικό έτος. Αξίζει αναφοράς επίσης το γεγονός, πως σχεδόν σε όλους τους σταθμούς, με εξαίρεση τους δύο παραθαλάσσιους που παρατηρείται μια πιο ομαλή κατανομή των τιμών του δείκτη, παρουσιάζονται εναλλαγές υγρών περιόδων με ξηρές, που διαρκούν από 10 έως και 30 μήνες.

Επίσης αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως το μοτίβο από τα θηκογράμματα σε όλους τους σταθμούς είναι παρόμοιο με το μεγαλύτερο εύρος τιμών να εμφανίζεται τους χειμερινούς μήνες, με την προσθήκη του Μαρτίου και του Νοεμβρίου σε κάποιους σταθμούς. Αντίστοιχα το μικρότερο εύρος τιμών εμφανίζεται την θερμή περίοδο κάτι που δικαιολογείται μερικώς από την απουσία βροχοπτώσεων και την σχετικά ομαλή θερμοκρασιακή διακύμανση, λόγω της σπανιότερης εμφάνισης οργανωμένων συστημάτων.

ΔΕΚΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ PDSI ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ





ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΟΠΤΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

Τα χαρακτηριστικά των χαρτών συνοπτικής ανάλυσης μιας περιοχής, συνήθως παρουσιάζουν μια πολύ καλή και αντιπροσωπευτική εικόνα για τον καιρό που επηρεάζει την περιοχή ενδιαφέροντος. Αντιπροσωπευτικές στάθμες ανάλυσης είναι συνήθως αυτές των 850, 700, 500 και 200 hPa, που χρησιμοποιούνται ως ενδεικτικές για την θερμοκρασία, την υγρασία, την αστάθεια, τους αεριοχείμαρους, και άλλα. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στο γεωδυναμικό ύψος των 500 hPa, το οποίο ορίζεται ως το επίπεδο μηδενικής σύγκλισης και δίνει μια πολύ καλή εικόνα των συνθηκών αστάθειας που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τον καιρό της περιοχής.

Πολλοί ερευνητές ασχολήθηκαν με το θέμα των συνοπτικών τύπων κυκλοφορίας (Lamb, 1972: Muller, 1977), και έγιναν πολλές κατατάξεις των τύπων κυκλοφορίας σε πολλές περιοχές του πλανήτη. Για την περιοχή της Μεσογείου και ιδιαίτερα τον Ελλαδικό χώρο έχουν εκπονηθεί αρκετές μελέτες (Καρακώστας, 1992: Κασσωμένος, 1998: Μαχαίρας, 2000: Καρακώστας, 2003), όπου αναλύθηκαν οι συνοπτικοί τύποι. Όμως, για την περιοχή της ανατολικής Μεσογείου και συγκεκριμένα στην περιοχή της Κύπρου, δεν βρέθηκε καμία κατάταξη. Για τις ανάγκες αυτής της μελέτης, κρίθηκε σκόπιμο, όπως δημιουργηθεί μια αντιπροσωπευτική κατάταξη με τους σημαντικότερους τύπους κυκλοφορίας. Μέρος των αποτελεσμάτων της κατάταξης αυτής δημοσιεύτηκαν και παρουσιάστηκαν στο πλαίσιο του COMECAP, που έγινε το 2018 στην Αλεξανδρούπολη, από τους Mouskos και Karacostas (2018).

5.1. Μεθοδολογία και δεδομένα

Η περίοδος που εξετάστηκε αφορά τη δεκαετία 2000-2009 και μελετήθηκαν συνολικά 3653 ημέρες. Κατασκευάστηκαν για κάθε μέρα τέσσερις χάρτες στις ώρες 00Z, 06Z 12Z και 18Z, με σκοπό να καταγραφούν και να συμπεριληφθούν όλα τα συστήματα που επηρέασαν την περιοχή για τη συγκεκριμένη περίοδο. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το IDV (Integrated Data Viewer, software from Unidata, Java based), ενώ τα δεδομένα λήφθηκαν από NOAA (National oceanic and Atmospheric administration database) και είναι GFS Reanalysis 0.5 degree grid.

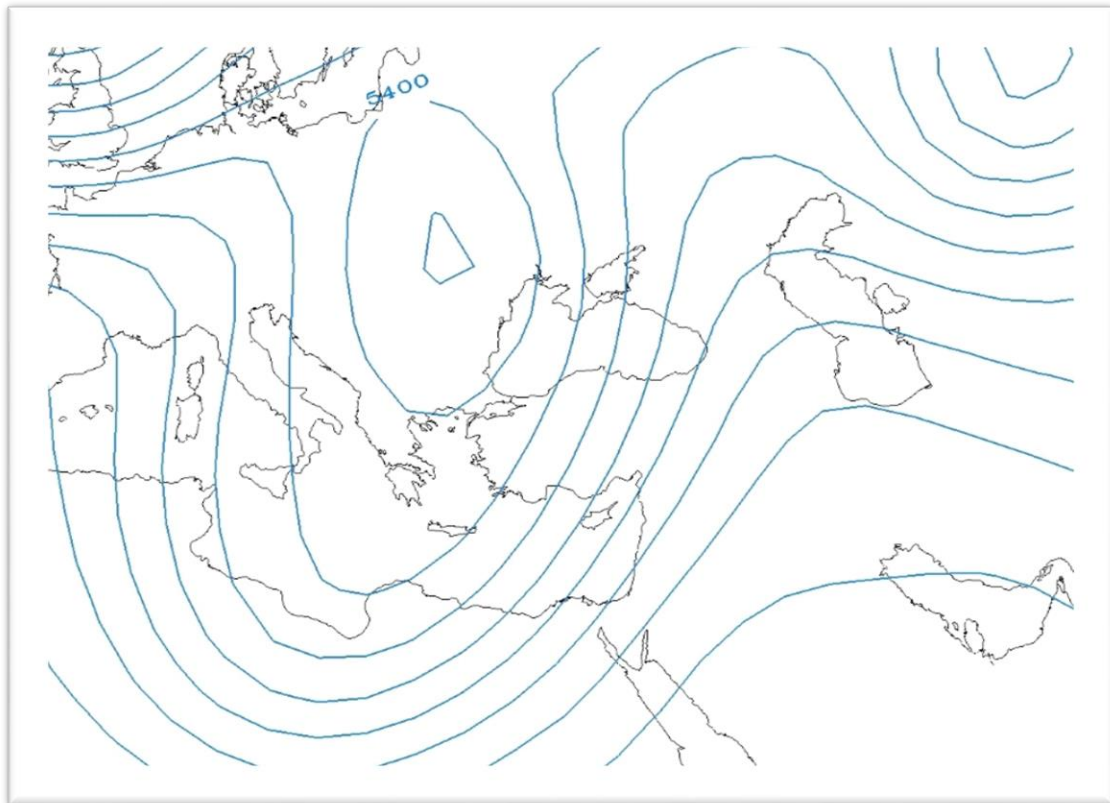
Αξίζει να αναφερθεί πως υπάρχουν δύο τρόποι για την ανάλυση της συνοπτικής κατάστασης μια περιοχής, ο αυτοματοποιημένος που γίνεται με τη χρήση λογισμικών και ο υποκειμενικός που γίνεται με βάση την κρίση του αναλυτή-μετεωρολόγου από τους χάρτες. Λόγω της εμπειρίας και οικειότητας του αναλυτή-μετεωρολόγου με χάρτες καιρού, η κατάταξη που περιγράφεται παρακάτω έγινε με τον υποκειμενικό τρόπο.

Παράλληλα με τους χάρτες στην στάθμη των 500 hPa έγινε και μελέτη της βροχόπτωσης στις συγκεκριμένες ημέρες, τόσο για αιτιολόγηση, όσο και για επαλήθευση του συνοπτικού τύπου κυκλοφορίας. Από τους συνοπτικούς τύπους κυκλοφορίας που συνήθως δίνουν ασταθείς καιρικές καταστάσεις στην Κύπρο, επελέγησαν για την ταξινόμηση επτά (7) τύποι, οι οποίοι αναλύονται και περιγράφονται παρακάτω.

5.2. Συνοπτικοί τύποι κυκλοφορίας

5.2.1. Νοτιοδυτική κυκλοφορία – South West flow (SW)

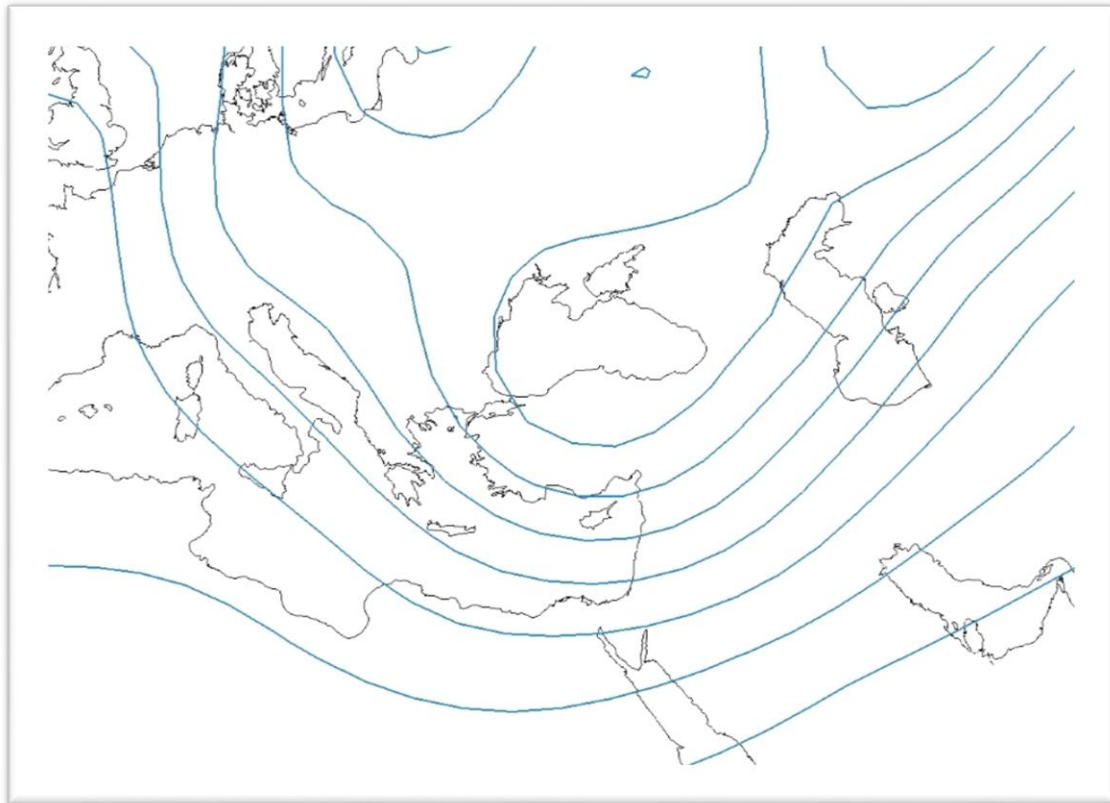
Ο συνοπτικός τύπος κυκλοφορίας SW συνήθως παρουσιάζεται όταν δυτικά της περιοχής υπάρχει αυλώνας ανοικτού κυματισμού (trough) και στα ανατολικά βαρομετρική ράχη (ridge). Η ροή στην ανώτερη ατμόσφαιρα είναι νοτιοδυτική και πολλές φορές σχηματίζονται μικρού κυματισμού αυλώνες και ράχες. Ψυχρές αέριες μάζες κινούνται από νοτιοδυτικά προς βορειοανατολικά, εμπλουτίζονται με υγρασία από τη θάλασσά της Μεσογείου, και αντικαθιστούν θερμότερες αέριες μάζες, προκαλώντας μέτριες συνθήκες αστάθειας. Στην επιφάνεια, συνήθως σχηματίζεται σύστημα χαμηλής βαρομετρικής πίεσης. Τους μήνες του χειμώνα, συνήθως συνοδεύεται από ψυχρό μέτωπο.



Σχήμα 5.1: Νοτιοδυτική κυκλοφορία (SW) στην ευρύτερη περιοχή της Κύπρου (500hPa).

5.2.2. Αυλώνας μεγάλου κυματισμού - Long Wave trough (L1)

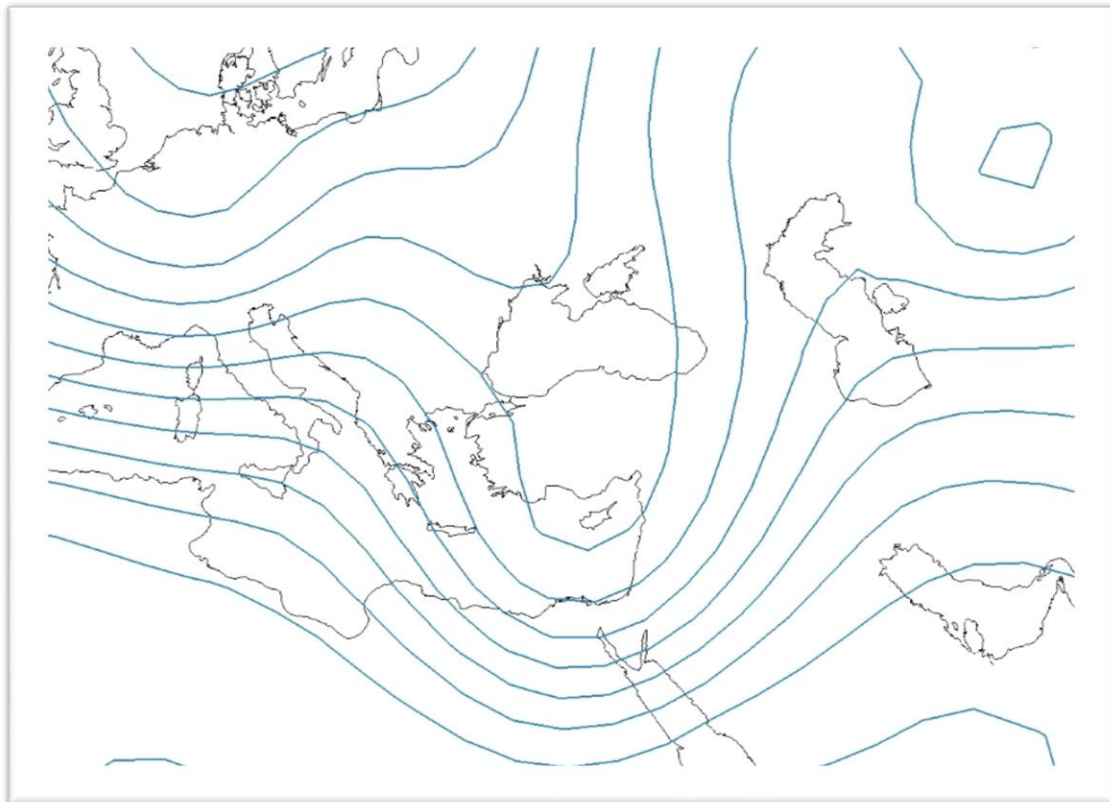
Την περιοχή επηρεάζει αργά κινούμενος, ή και σχεδόν στάσιμος βαρομετρικός αυλώνας (trough). Η ροή στην ανώτερη ατμόσφαιρα είναι νοτιοδυτική - δυτική πριν τον άξονα του συστήματος, και δυτική – βορειοδυτική μετά από αυτόν. Στην επιφάνεια σχηματίζεται σύστημα χαμηλής ατμοσφαιρικής πίεσης, το οποίο κινείται με τον άξονα του συστήματος συνήθως συνοδευόμενο με μετωπική δραστηριότητα. Αναμένονται μέτριες, έως έντονες, συνθήκες αστάθειας.



Σχήμα 5.2: Αυλώνας ανοικτού κυματισμού - (L1), στην ευρύτερη περιοχή της Κύπρου. Ο άξονας του συστήματος είναι αμέσως μετά το νησί (500hPa).

5.2.3. Αυλώνας μικρού κυματισμού - Short Wave trough (L2)

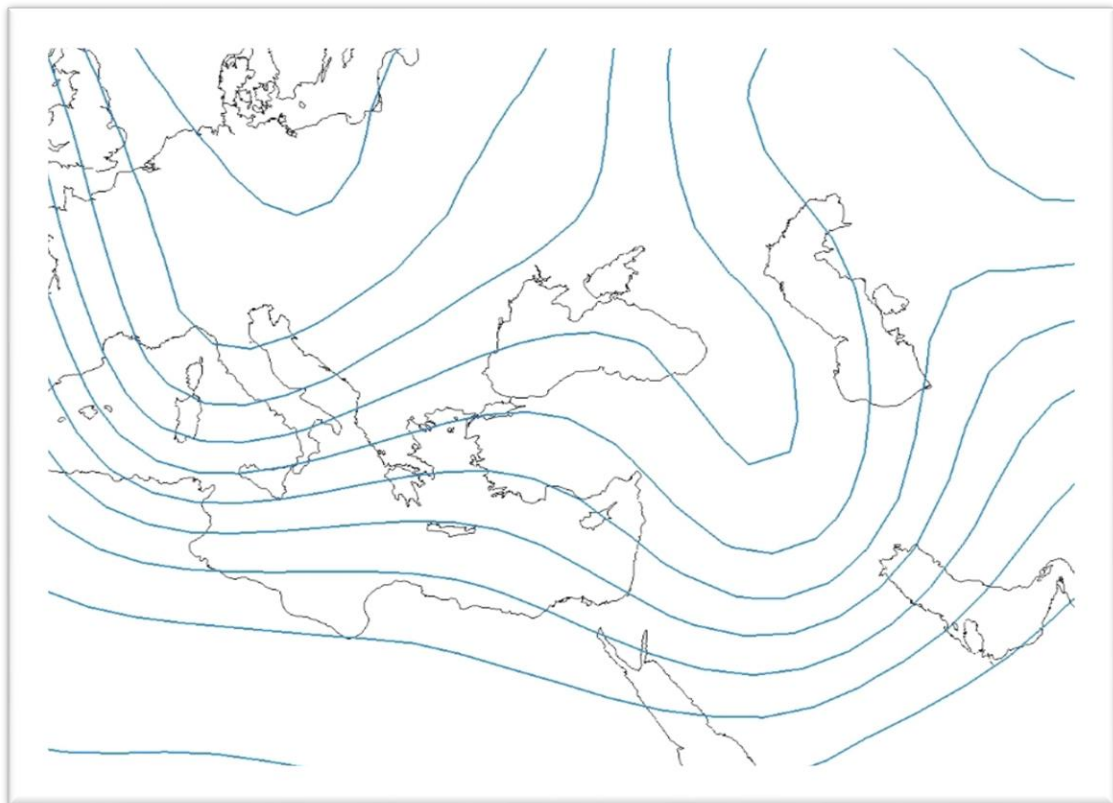
Την περιοχή επηρεάζει ένας γρήγορα κινούμενος αυλώνας, ο οποίος συνήθως περνά από την περιοχή σε διάστημα λιγότερο των 24 ωρών, προκαλώντας πολύ έντονες συνθήκες αστάθειας. Το σύστημα είναι πολύ πιο καλά οργανωμένο από τον τύπο (L1), με βαρομετρικό χαμηλό στην επιφάνεια, μετωπική δραστηριότητα, και συνήθως συνοδεύεται από πολύ ισχυρούς άνεμους.



Σχήμα 5.3: Αυλώνας μικρού κυματισμού - (L2), στην ευρύτερη περιοχή της Κύπρου. Ο άξονας του συστήματος είναι λίγο πριν από το νησί (500hPa).

5.2.4. Βορειοδυτική κυκλοφορία North - West flow (NW)

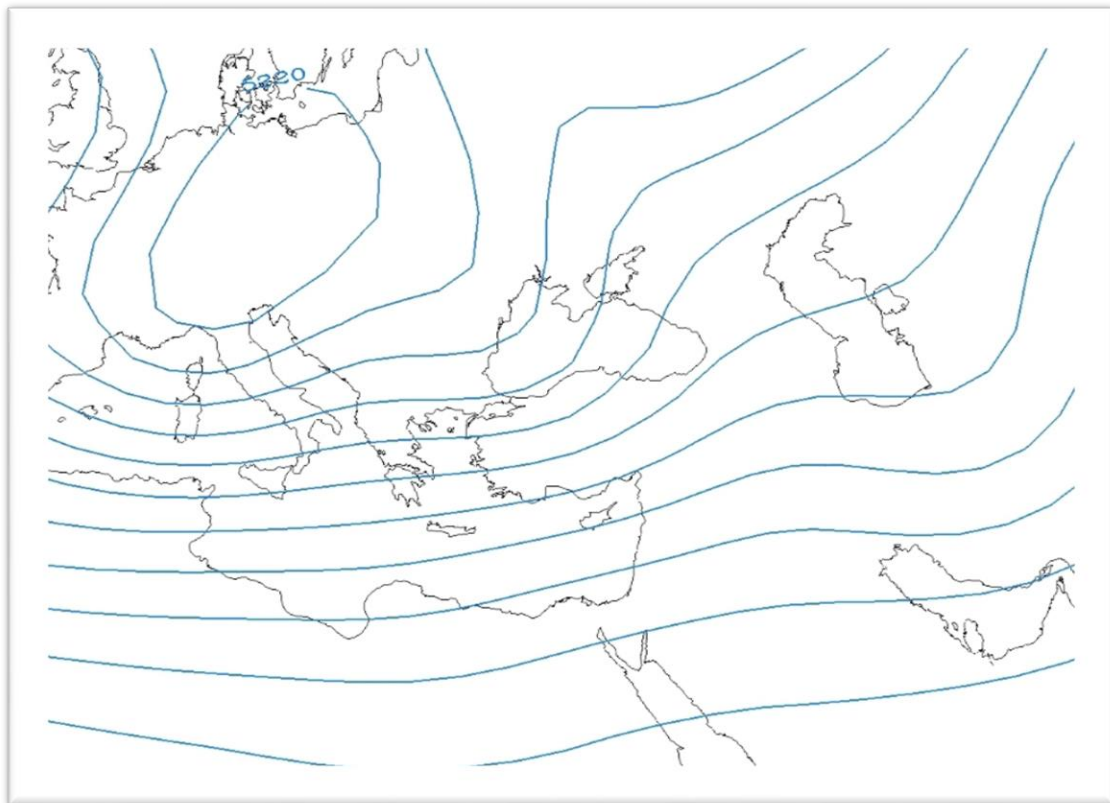
Ο τύπος κυκλοφορίας NW παρουσιάζεται όταν δυτικά της περιοχής υπάρχει βαρομετρική ράχη (ridge), ενώ στα ανατολικά αυλώνας (trough). Συνήθως παρουσιάζεται μετά το πέρασμα αυλώνα ανοικτού κυματισμού (L1), ο οποίος κινείται αργά προς τα ανατολικά. Η ροή στην ανώτερη ατμόσφαιρα είναι βορειοδυτική και συχνά σχηματίζονται μικρού κυματισμού αυλώνες και ράχες. Όταν παρουσιάζεται τη χειμερινή περίοδο, συνδέεται με ψυχρές αέριες μάζες, συνήθως συνδεδεμένες με ψυχρά μέτωπα.



Σχήμα 5.4: Βορειοδυτική κυκλοφορία North - (NW), στην ευρύτερη περιοχή της Κύπρου(500hPa).

5.2.5. Ζωνική κυκλοφορία - Zonal flow (ZON)

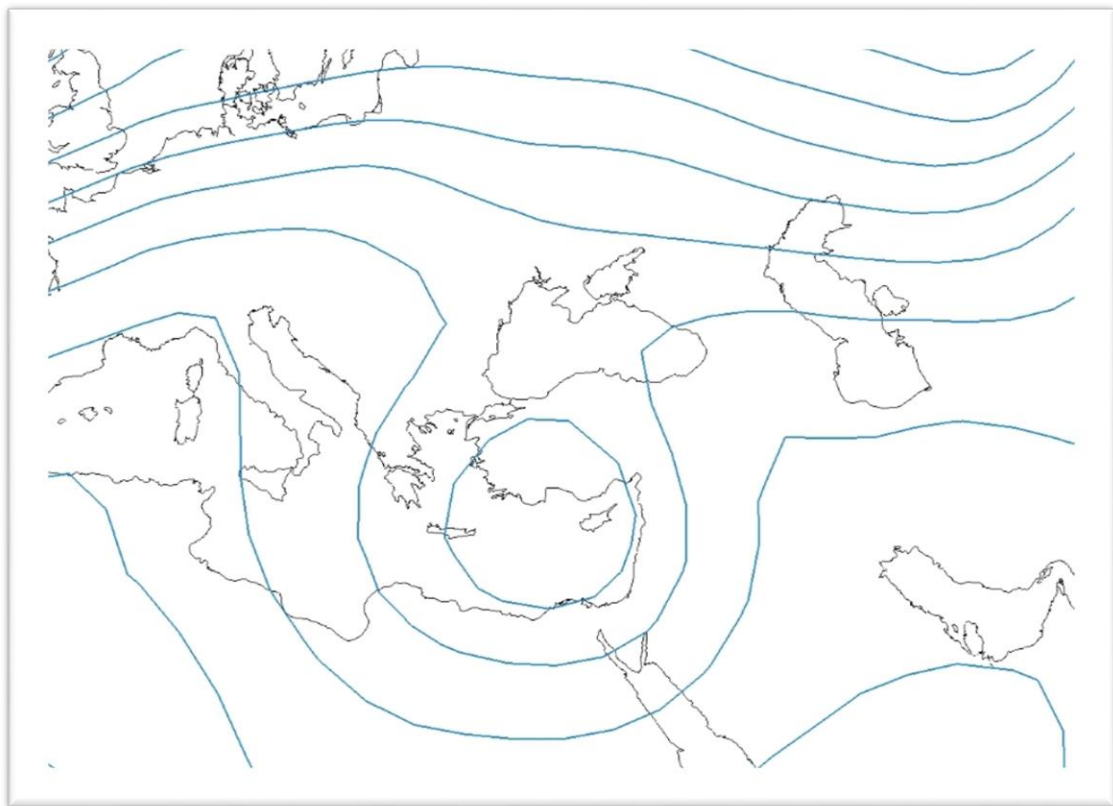
Όταν βόρεια της περιοχής υπάρχει αυλώνας ανοικτού κυματισμού και νότια της περιοχής υπάρχει ράχη, τότε στην περιοχή σχηματίζεται ζωνική κυκλοφορία. Μπορεί επίσης να σχηματιστεί όταν η περιοχή επηρεάζεται από αυλώνα ή ράχη μεγάλου μήκους κύματος. Ψυχρές αέριες μάζες βόρεια και θερμότερες νότια προκαλούν μέτριες συνθήκες αστάθειας. Όσο πιο έντονη είναι η βαροβαθμίδα, τόσο πιο δυνατοί είναι οι άνεμοι, καθώς και η κίνηση των βαρομετρικών χαμηλών συστημάτων και των μετώπων που συνδέονται με την κυκλοφορία.



Σχήμα 5.5: Ζωνική κυκλοφορία - (ZON), στην ευρύτερη περιοχή της Κύπρου (500hPa).

5.2.6. Κλειστό χαμηλό - Closed Low (CLO)

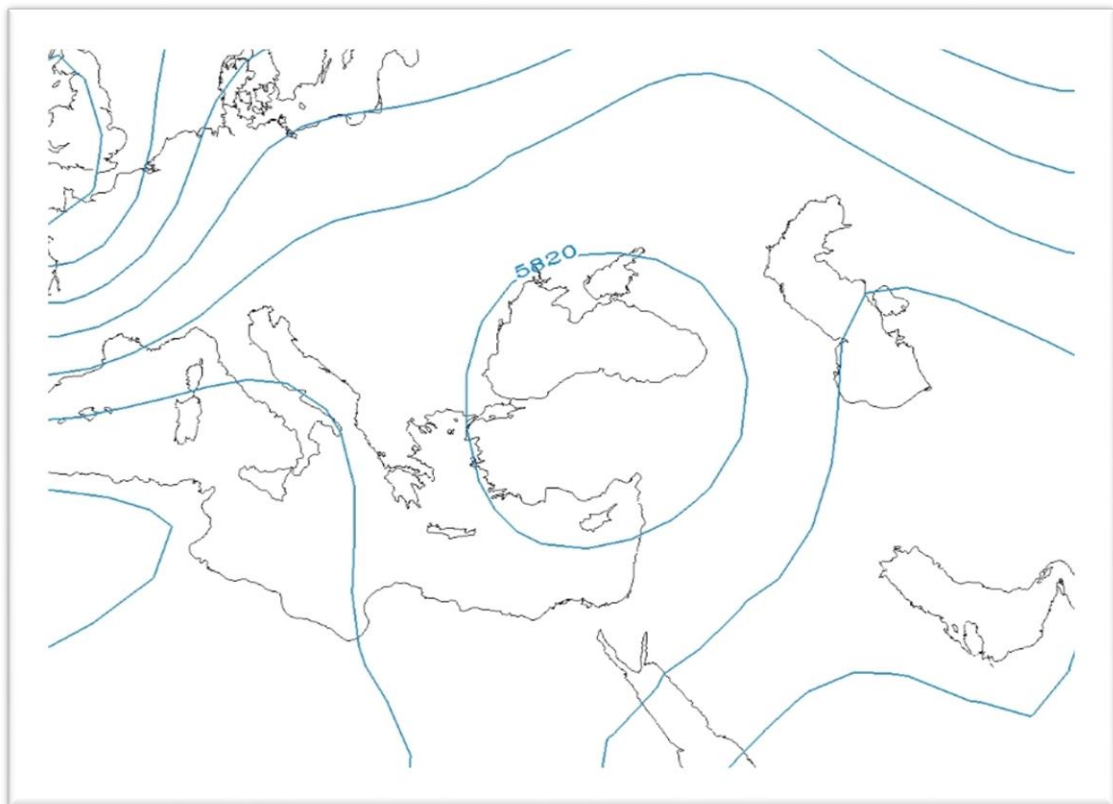
Η περιοχή επηρεάζεται από κλειστό βαρομετρικό χαμηλό, το οποίο κινείται μαζί με τον άξονα του αυλώνα που το περιβάλλει. Αναμένονται έντονες συνθήκες αστάθειας. Στην επιφάνεια παρατηρείται σύστημα χαμηλής ατμοσφαιρικής πίεσης, συνήθως συνδεδεμένο με μετωπική δραστηριότητα. Τη χειμερινή περίοδο, το σύστημα είναι ένα καλά οργανωμένο βαρομετρικό χαμηλό. Από την κλίση του συστήματος, φαίνεται η κίνηση και η δυναμική του, καθώς και η παραμονή του στην περιοχή.



Σχήμα 5.6: Κλειστό χαμηλό - (CLO), στην ευρύτερη περιοχή της Κύπρου. Το σύστημα επηρεάζει σχεδόν όλη την Ανατολική Μεσόγειο (500hPa).

5.2.7. Αποκομμένο χαμηλό - Cut-Off Low (CUT)

Ο τύπος αποκομμένο χαμηλό είναι το ώριμο στάδιο των τύπων (CLO) ή ακόμη και (L1). Όταν η κλίση του συστήματος γίνει σχεδόν κατακόρυφη, τότε η κινητική ενέργεια του συστήματος μετατρέπεται σε δυναμική, και το βαρομετρικό χαμηλό παραμένει στη περιοχή σχεδόν στάσιμο, μέχρι να μετακινηθεί, λόγω της μετατροπής της δυναμικής ενέργειας σε κινητική. Δημιουργούνται έντονες συνθήκες αστάθειας, ειδικά στα πρώτα στάδια, με την εκδήλωση καταιγίδων, συνήθως από θερμικά αίτια.



Σχήμα 5.7: Αποκομμένο χαμηλό - (CUT), στην ευρύτερη περιοχή της Κύπρου (500hPa).

5.3. Κατάταξη των συνοπτικών τύπων κυκλοφορίας

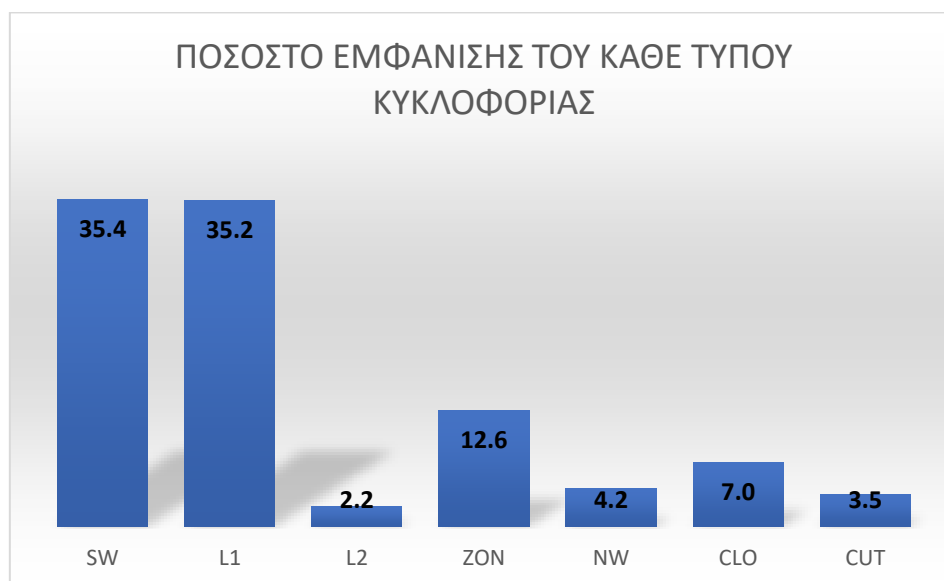
Για την περίοδο των δέκα χρόνων (2000-2009) αναλύθηκαν 3653 μέρες, που για την κάθε μια κατασκευάστηκαν τέσσερις χάρτες ανά έξι ώρες. Το 51.1%, δηλαδή 1867 μέρες επηρεάστηκαν από ένα από τους επτά τύπους κυκλοφορίας που προαναφέρθηκαν, ενώ οι υπόλοιπες μέρες επηρεάστηκαν, είτε από ευσταθείς

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΟΠΤΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

αντικυκλωνικούς τύπους, είτε η κατάστασή τους ήταν αδιευκρίνιστη. Αξίζει να αναφερθεί πώς δεν παρουσιάστηκαν μέρες οι οποίες επηρεάστηκαν πέραν από ένα συνοπτικό τύπο, κάτι που οφείλεται στην μικρή περιοχή ενδιαφέροντος. Από τις μέρες που ταξινομήθηκαν, οι περισσότερες περιπτώσεις ανήκουν στους τύπους SW και L1, που μαζί αντιστοιχούν περίπου στο 70% των περιπτώσεων. Αντίθετα οι λιγότερο εμφανιζόμενοι τύποι είναι οι L2 και CUT, με 2.2% και 3.5%, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της κατάταξης απεικονίζονται στον Πίνακα 5.1 και το Σχήμα 5.8.

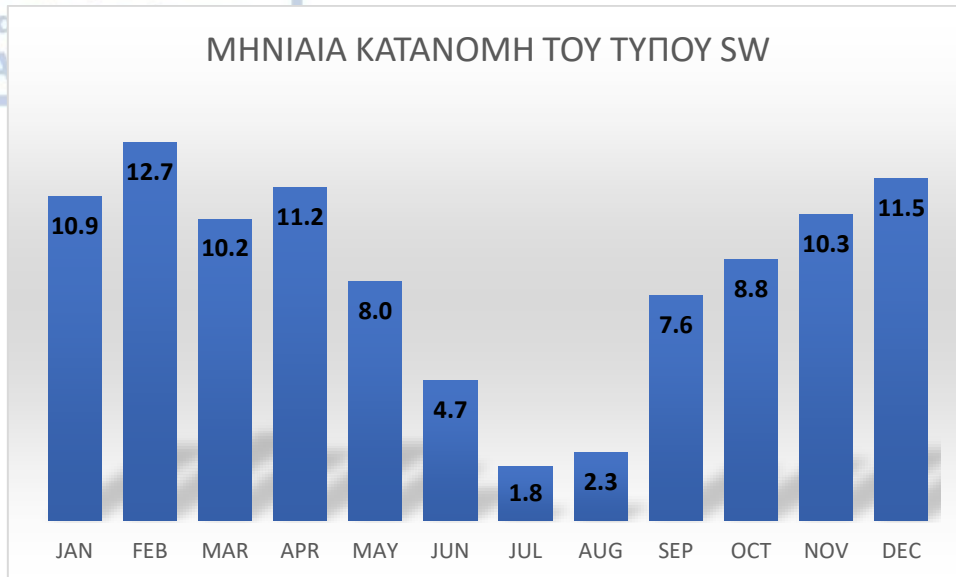
Πίνακας 5.1. Συνολικά αποτελέσματα της κατάταξης των τύπων κυκλοφορίας.

Τύπος	SW	L1	L2	ZON	NW	CLO	CUT
Περιπτώσεις	660	658	41	235	78	130	65
Ποσοστό %	35.4	35.2	2.2	12.6	4.2	7.0	3.5

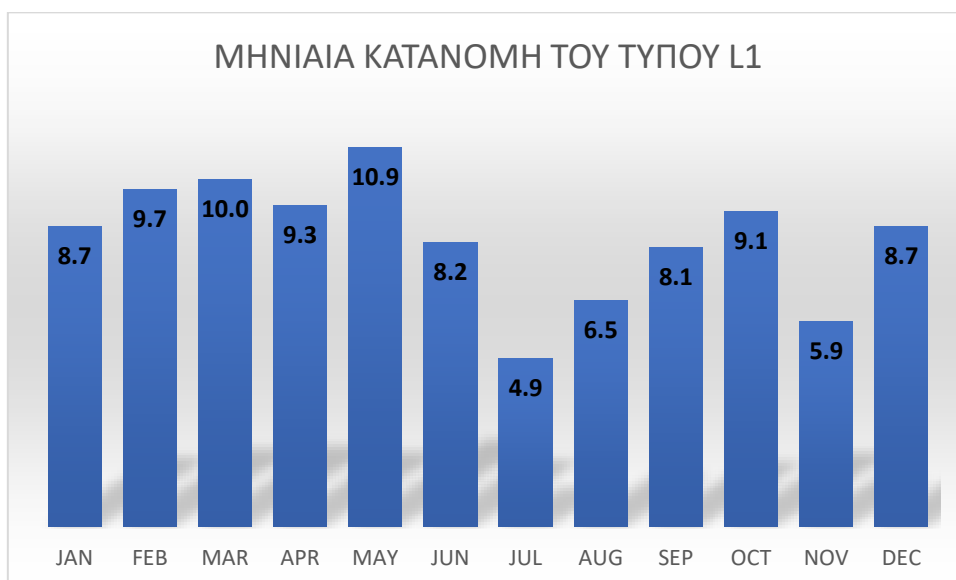


Σχήμα 5.8: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της κατάταξης των συνοπτικών τύπων κυκλοφορίας.

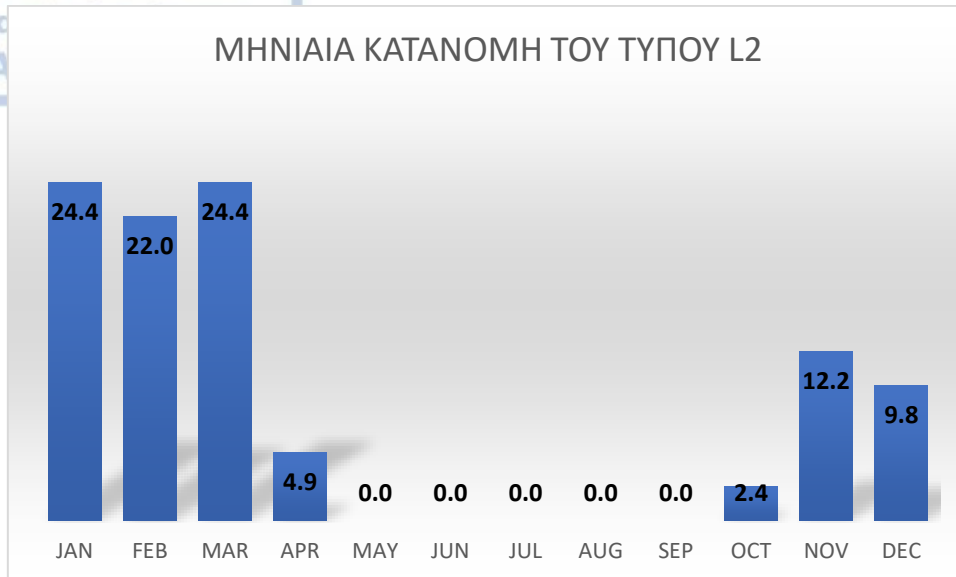
Η μηνιαία ταξινόμηση των περιπτώσεων του κάθε τύπου παρουσιάζει επίσης ενδιαφέρον και φαίνεται στα πιο κάτω σχήματα.



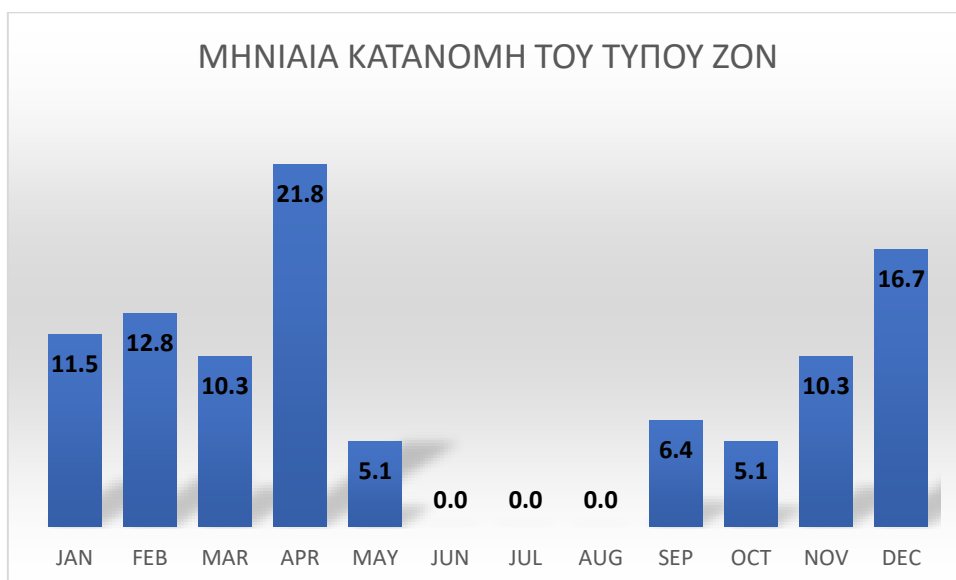
Σχήμα 5.9: Μηνιαία ταξινόμηση του τύπου SW.



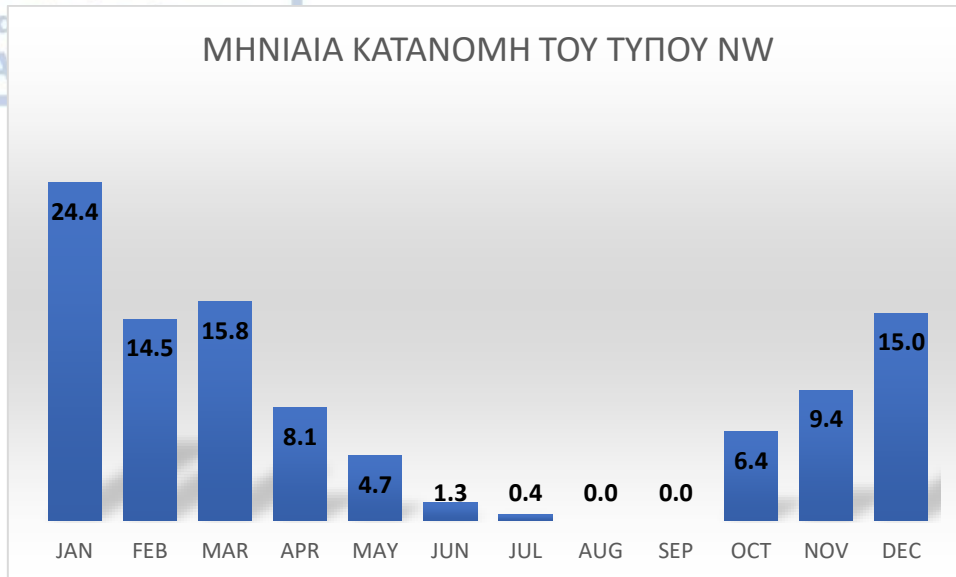
Σχήμα 5.10: Μηνιαία ταξινόμηση του τύπου L1.



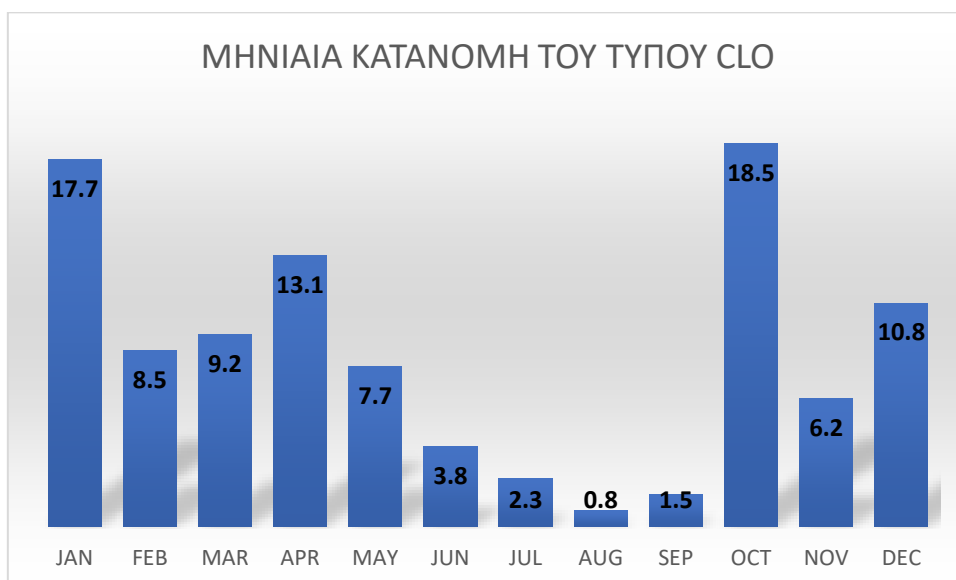
Σχήμα 5.11: Μηνιαία ταξινόμηση του τύπου L2.



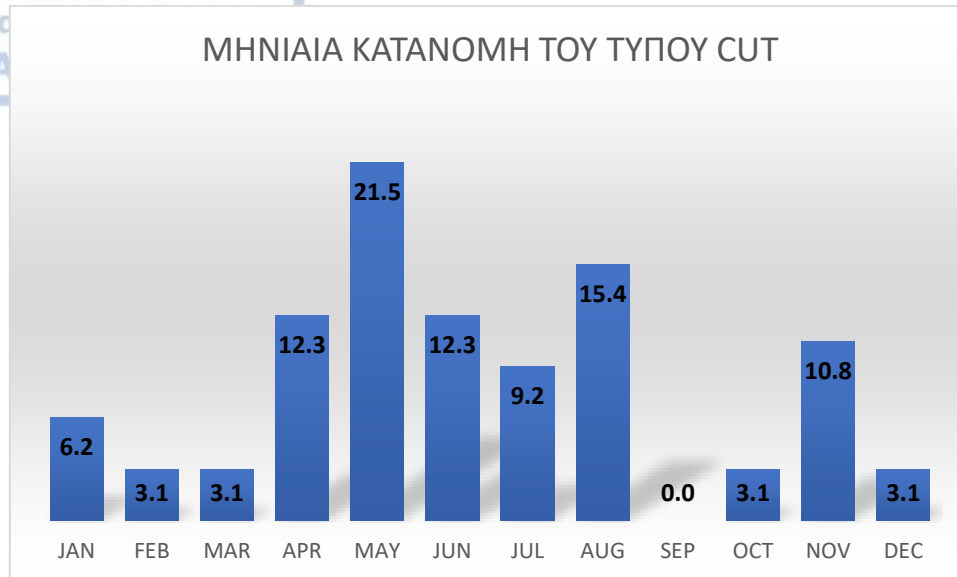
Σχήμα 5.12: Μηνιαία ταξινόμηση του τύπου ZON.



Σχήμα 5.13: Μηνιαία ταξινόμηση του τύπου NW.



Σχήμα 5.14: Μηνιαία ταξινόμηση του τύπου CLO.



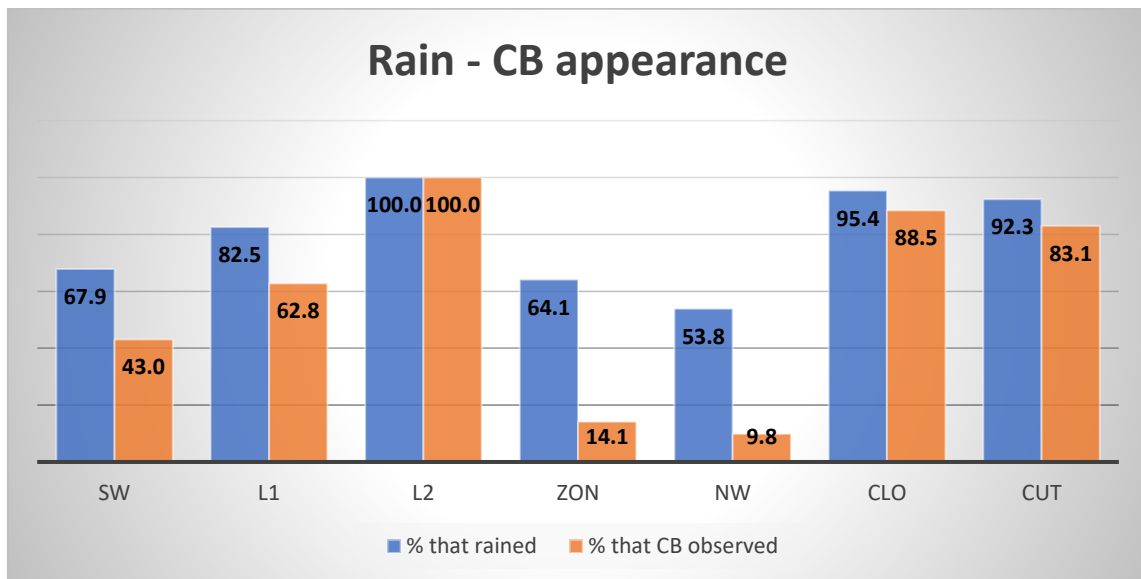
Σχήμα 5.15: Μηνιαία ταξινόμηση του τύπου CUT.

5.4. Επιμέρους συμπεράσματα

Όπως φαίνεται από τις γραφικές απεικονίσεις των σχημάτων 5.9 έως και 5.15, ο κάθε συνοπτικός τύπος κυκλοφορίας παρουσιάζεται με διαφορετικό μοτίβο ανά μήνα. Ο πιο συχνά εμφανιζόμενος τύπος, ο SW, κατανέμεται με ποσοστό που κυμαίνεται από 8% μέχρι 13% περίπου, με εξαίρεση τους μήνες του καλοκαιριού, όπου το ποσοστό εμφάνισης είναι σαφώς μικρότερο. Για τον τύπο L1, φαίνεται μια ομαλή εμφάνιση καθ' όλη τη διάρκεια του έτους σε ποσοστό περίπου 9%, με το μέγιστο να παρουσιάζεται τον Μάιο και το ελάχιστο τον Ιούλιο. Για τον τύπο L2 προκύπτει το συμπέρασμα πως πρόκειται για ένα καθαρά χειμερινό τύπο, με το 70% των περιπτώσεων να παρουσιάζονται το χειμώνα. Εμφανής είναι η απουσία του για τους μήνες Μάιο – Σεπτέμβριο. Εμφανής και η απουσία του τύπου ZON τους καλοκαιρινούς μήνες, με το μέγιστο να παρουσιάζεται τον Απρίλιο σε ποσοστό περίπου 22%. Αντίστοιχα είναι και τα αποτελέσματα για τον τύπο NW, με ελάχιστες περιπτώσεις τους καλοκαιρινούς μήνες, ενώ το μέγιστο εμφανίζεται τον Ιανουάριο σε ποσοστό 24.4%. Ο τύπος CLO δεν παρουσιάζει κάποια κανονικότητα εμφάνισης, με λίγες περιπτώσεις το καλοκαίρι, αλλά με την εμφάνιση δύο μεγίστων τους μήνες Ιανουάριο και Οκτώβριο. Τέλος ο τύπος CUT παρουσιάζεται συχνότερα την περίοδο Απρίλιο – Αύγουστο με μέγιστο τον Μάιο, και με εμφανή την απουσία του τον Σεπτέμβριο, καθώς και τα χαμηλά ποσοστά εμφάνισης τους μήνες Φεβρουάριο, Μάρτιο Οκτώβριο και Δεκέμβριο.

5.5. Σύνδεση συνοπτικού τύπου κυκλοφορίας με την βροχόπτωση.

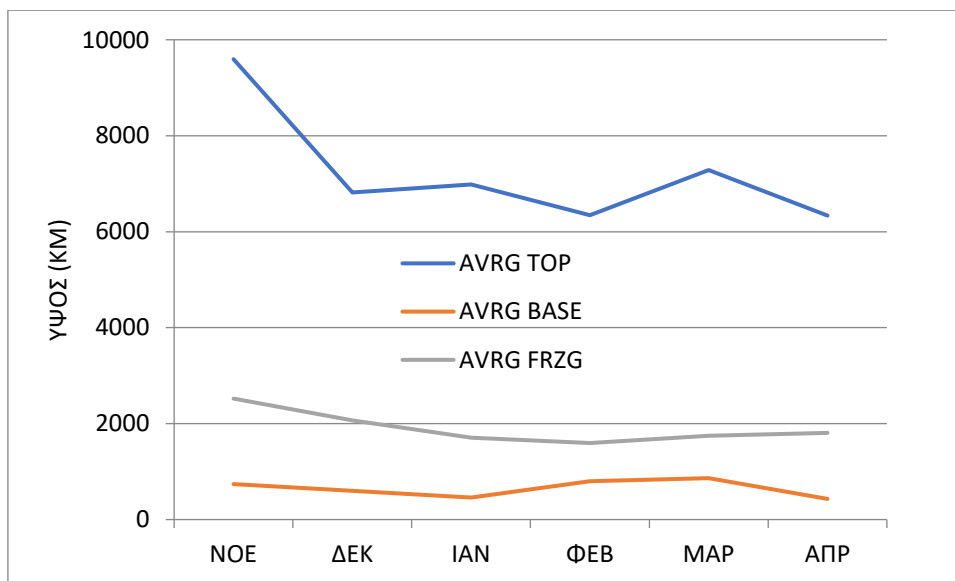
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η καταγραφή της βροχόπτωσης για τις μέρες που αντιστοιχούν σε κάποιο συνοπτικό τύπο κυκλοφορίας. Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία που παραχωρήθηκαν από το Τμήμα Μετεωρολογίας του Υπουργείου Γεωργίας της Κύπρου. Τα δεδομένα αφορούσαν καταγραφές ημερήσιας βροχόπτωσης από 37 σταθμούς, με στόχο να υπολογιστεί η «απόδοση της βροχής» για τον κάθε συνοπτικό τύπο κυκλοφορίας. Μελετήθηκε η βροχόπτωση από τους σταθμούς και αν σε κάποιο σταθμό υπήρξε καταγραφή μεγαλύτερη από 0.2 χιλιοστά, αυτή θεωρήθηκε ως μέρα βροχής. Επίσης μελετήθηκαν και φόρμες παρατήρησης από τους επανδρωμένους σταθμούς του τμήματος και καταγράφηκαν οι μέρες που ο παρατηρητής κατέγραψε καταιγίδα (Cumulonimbus – CB), σωρείτες κατακόρυφης ανάπτυξης (Towering Cumulus – TCU) και αναπτύξεις στη μέση ατμόσφαιρα (Alto cumulus Castellanus – AC). Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης φαίνονται στο Σχήμα 5.16.



Σχήμα 5.16: Σύνδεση του κάθε συνοπτικού τύπου κυκλοφορίας με την βροχόπτωση. Η στήλη με μπλε χρώμα αντιστοιχεί στις περιπτώσεις όπου καταγράφηκε βροχή όταν επηρέασε την περιοχή ο κάθε τύπος και με πορτοκαλί χρώμα οι περιπτώσεις που έγινε καταγραφή καταιγίδας.

5.6. Ανάλυση της κατακόρυφης δομής των καταιγίδων ανά συνοπτικό τύπο.

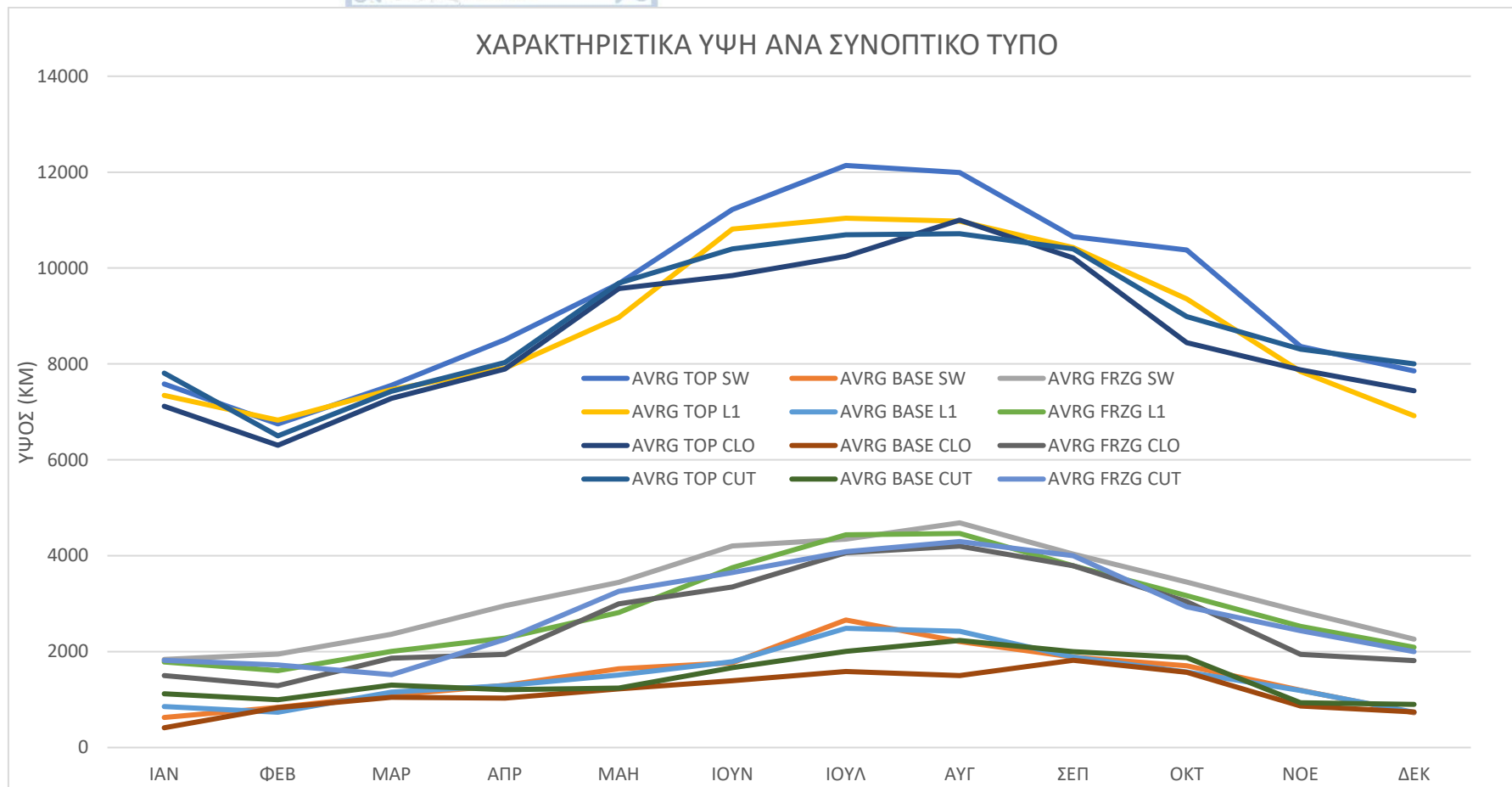
Για την ανάλυση της κατακόρυφης δομής των καταιγίδων απαραίτητο εργαλείο είναι το ραντάρ καιρού. Λόγω της μη ύπαρξης ραντάρ στην Κύπρο για την εξεταζόμενη περίοδο, χρησιμοποιήθηκαν τα τεφιγράμματα που κατασκευάστηκαν με το πρόγραμμα RAOB, από τα οποία υπολογίζονται μεταξύ άλλων και χαρακτηριστικά ύψη της ατμόσφαιρας. Ως βάση νεφών επιλέγηκαν να χρησιμοποιηθούν τα ύψη LCL, CCL και LFC (Lifting Condensation Level, Convective Condensation Level και Level of Free Convection αντίστοιχα) ενώ ως κορυφή των καταιγίδων το ύψος EL (Equilibrium Level). Όταν υπολογιζόταν πέραν της μίας παραμέτρους για τη βάση των νεφών, γινόταν επιλογή της παραμέτρου LFC, ενώ αν δεν υπολογιζόταν αυτή, τότε γινόταν επιλογή της χαμηλότερης μεταξύ των άλλων δύο. Για τη βάση των νεφών έγινε σύγκριση με τις παρατηρήσεις τις μέρες εμφάνισης καταιγίδας και φάνηκε ότι ο υπολογισμός από το πρόγραμμα είναι πολύ κοντά στην παρατήρηση. Για τις κορυφές των νεφών δεν υπήρξε κάποιος τρόπος επαλήθευσης και πρέπει να τονιστεί ότι αποτελεί εκτίμηση. Στο σχήμα 5.17 παρουσιάζεται για τον τύπο L2 οι μέσες κορυφές, βάσεις καθώς και το επίπεδο παγοποίησης (AVRG TOP, AVRG BASE, AVRG FRZG). Ο τύπος L2 παρουσιάζεται ξεχωριστά (και για την περίοδο Νοέμβριος – Απρίλιος) λόγω της μη εμφάνισης του για 5 μήνες στο έτος. Οι τύποι SW, L1, CLO και CUT παρουσιάζονται μαζί στο σχήμα 5.18 ώστε να γίνεται άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων.





Σχήμα 5.17: Μέσες τιμές της βάσης και της κορυφής των καταγίδων για τον τύπο L2. Με γκριζο χρώμα είναι το επίπεδο παγοποίησης.





Σχήμα 5.18: Μέσες τιμές των υψών και των βάσεων των καταιγίδων, καθώς και του επιπέδου παγοποίησης της ατμόσφαιρας για τους τύπους SW, L1, CLO και CUT

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.18 οι πιο χαμηλές κορυφές εμφανίζονται τον Φεβρουάριο (περίπου 6-7 χιλιόμετρα) και για τους 4 τύπους. Κάτι που ισχύει και για τον τύπο L2 στο σχήμα 5.17. οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται όπως αναμενόταν τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο με την SW να εκτείνεται περίπου στα 12 χιλιόμετρα και τις υπόλοιπες στα 10 με 11 χιλιόμετρα.

5.7. Επιμέρους συμπεράσματα

Ένα γενικό και συγχρόνως σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως, από τις 3653 μέρες που εξετάστηκαν, οι 1867, ή το 51%, επηρεάστηκαν από ένα συνοπτικό τύπο κυκλοφορίας, όπου ευνοούνται ασταθείς καιρικές συνθήκες. Δηλαδή, στις μισές ημέρες του έτους -όπως προκύπτει από αυτό το στατιστικό- είναι πιθανό να σημειωθούν βροχοπτώσεις. Οι πιο συχνά εμφανιζόμενοι συνοπτικοί τύποι κυκλοφορίας είναι οι SW και L1, οι οποίοι εμφανίζονται σε ποσοστό περίπου σε 35% έκαστος, με τους υπόλοιπους πέντε συνοπτικούς τύπους κυκλοφορίας να εμφανίζονται με σαφώς μικρότερα ποσοστά.

Όπως ήταν αναμενόμενο, ο συνοπτικός τύπος κυκλοφορίας L2 είναι ο πιο αποδοτικός, με το 100% των περιπτώσεων να δίνει βροχές, σε αρκετές περιπτώσεις χιόνια, αλλά και καταιγίδες. Πολύ αποδοτικοί εμφανίζονται και οι τύποι CLO και CUT, με την παρουσία βροχής σε ποσοστά 95.4% και 92.3%, αντίστοιχα, ενώ αρκετά ψηλά είναι και το ποσοστό εμφάνισης καταιγίδας που κυμαίνονται σε 88.5% και 83.1%, αντίστοιχα. Οι πιο συχνά εμφανιζόμενοι συνοπτικοί τύποι κυκλοφορίας παρουσιάζουν επίσης ψηλά ποσοστά, με τον L1 να δίνει βροχή στο 82.5% των περιπτώσεων και την εμφάνιση καταιγίδας στο 62.8%, ενώ λίγο χαμηλότερα είναι τα ποσοστά του SW με την παρουσία βροχής στο 67.9% και την εμφάνιση καταιγίδας στο 43%. Τέλος οι τύποι NW και ZON παρόλο που δίνουν βροχή σε ποσοστά 64.1% και 53.8% αντίστοιχα, δεν φαίνεται να δημιουργούν έντονη αστάθεια σε πολλές περιπτώσεις, με την εμφάνιση καταιγίδων και νεφών έντονης κατακόρυφης ανάπτυξης να καταγράφεται μόνο στο 14.1% και 9.8% των ημερών που παρουσιάστηκαν. Το μικρό αυτό ποσοστό δείχνει ότι για την περιοχή της Κύπρου οι τύποι NW και ZON δεν ευνοούν έντονες συνθήκες αστάθειας, κάτι που οδήγησε στην εξαίρεση τους από την διαδικασία υπολογισμού της συνάρτησης εκτίμησης της βροχόπτωσης, που αναπτύσσεται στο επόμενο κεφάλαιο.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

Ένας από τους στόχους αυτής της διατριβής ήταν να βρεθεί μια συνάρτηση εκτίμησης-υπολογισμού της βροχόπτωσης για τον κάθε συνοπτικό τύπο κυκλοφορίας. Για να υπολογιστεί η εν λόγω συνάρτηση εφαρμόστηκε η μέθοδος της πολλαπλής παλινδρόμησης. Ως εξαρτημένη μεταβλητή τέθηκε η μέση τιμή της ημερήσιας τιμής της βροχόπτωσης για 37 σταθμούς της Κύπρου, δεδομένα που παραχωρήθηκαν από το Τμήμα Μετεωρολογίας της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας της Κύπρου, για την περίοδο των 10 ετών που προαναφέρθηκαν, δηλαδή 2000 με 2009. Ως ανεξάρτητες μεταβλητές θεωρήθηκαν οι παράμετροι που υπολογίστηκαν από την απεικόνιση των δεδομένων των ραδιοβολίσεων, που γίνονται στο σταθμό της Αθαλάσας, σε τεφιγράμματα.

6.1. Επιλογή των ανεξάρτητων μεταβλητών

Τα δεδομένα ψηφιοποιήθηκαν μετά την απεικόνιση των ραδιοβολίσεων σε τεφιγράμμα, κάτι που έγινε με την χρήση του προγράμματος RAOB. Το τεφιγράμμα δίνει το προφίλ της ατμόσφαιρας και παράλληλα υπολογίζονται από το πρόγραμμα διάφορα αντιπροσωπευτικά ύψη και κάποιοι δείκτες αστάθειας που δίνουν πληροφορίες για την ατμόσφαιρα, την θερμοδυναμική και τη δυναμική της δομή. Αυτές οι παράμετροι ήταν: LCL, CCL, LFC, Equilibrium level και δείκτες αστάθειας, όπως: PW, SWEAT, CAP, BOYDEN, S(TT), KO, TT, KI, CAPE, CIN, DCAPE, CIN, VGP, EHI ΚΑΙ BRN.

Στη συνέχεια δημιουργήθηκε ένας πίνακας συσχετισμού (correlation matrix), ώστε να φανεί ποιοι από τους δείκτες και τις υπόλοιπες παραμέτρους θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν, με στόχο να βρεθεί η μεγαλύτερη συσχέτιση με την εξαρτημένη μεταβλητή, τη βροχόπτωση. Κάποιοι από αυτούς παρουσίασαν καλύτερη ανταπόκριση από τους υπόλοιπους και αφού ελέγχθηκαν για την αντιπροσωπευτικότητά τους και τη φυσική τους σημασία, επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν.

Τα κατώφλια που αναγράφονται στους πίνακες που ακολουθούν είναι αυτά που υπολογίστηκαν από τους δημιουργούς των δεικτών, και ισχύουν βέβαια για τις περιοχές στις οποίες έγιναν οι μελέτες. Για την περιοχή της Κύπρου δεν υπάρχουν αντίστοιχες μελέτες και ως εκ τούτου υιοθετούνται οι διαβαθμίσεις των παραμέτρων όπως υπολογίστηκαν αρχικά.

6.1.1. Υετίσιμο νερό (Precipitable Water – PW)

Ως υετίσιμο νερό ορίζεται η ποσότητα των υδρατμών που περιέχεται σε μια στήλη μοναδιαίας διατομής και μπορεί να υπολογιστεί μεταξύ δύο οποιονδήποτε επιπέδων της ατμόσφαιρας (Huschke, 1959). Αν τα δυο αυτά επίπεδα είναι η επιφάνεια της γης και το μέγιστο ύψος της ατμόσφαιρας και οι υδρατμοί περισυλλεχθούν σε δοχείο μοναδιαίας διατομής, τότε υπολογίζεται το ολικό υετίσιμο νερό. Η σχέση που υπολογίζεται είναι:

$$PW = \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} r(P) dP \quad (6.1)$$

όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας και $r(P)$ η αναλογία μίγματος στα επίπεδα ατμοσφαιρικής πίεσης P_1 και P_2 . Η ποσότητα PW έχει μονάδες μέτρησης τα mm νερού. Σύμφωνα με τους Καρακώστα και Σιούτα (1992), το υετίσιμο νερό είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος, η οποία αντιστοιχεί στο διαθέσιμο ποσό υγρασίας που μπορεί να αποδοθεί σε βροχοπτώσεις γενικά, αλλά και ειδικότερα σε καταιγίδες. Σημαντικό είναι και το γεγονός ότι υπολογίζεται άμεσα από την ανάλυση μιας αντιπροσωπευτικής ραδιοβόλισης.

6.1.2. Δείκτης SWEAT (Severe Weather Threat Index)

Ο δείκτης SWEAT αναπτύχθηκε από τον Miller το 1972 και δίνει εκτίμηση της δυνατότητας ανάπτυξης πολύ ισχυρών καταιγίδων. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$SWEAT = 12 * Td_{850} + 20 * (TT - 49) + 2 * 1.94 * V_{850} + 1.94 * V_{500} + 125 * (S + 0.2) \quad (6.2)$$

όπου $S = \sin (dd_{500} - dd_{850})$, $dd_{500} - dd_{850}$ η διαφορά της διεύθυνσης του ανέμου στα επίπεδα 500 και 850 hPa, Td_{850} το σημείο δρόσου στα 850 hPa, TT τη τιμή του δείκτη Total Totals, και V_{850} , V_{500} την ταχύτητα του ανέμου στα επίπεδα 850 και 500 hPa. Το εύρος των τιμών του δείκτη περιγράφεται στον Πίνακα 6.1

Πίνακας 6.1: Εύρος τιμών δείκτη SWEAT

Τιμές δείκτη SWEAT	Περιγραφή
<250	Χαμηλή πιθανότητα καταιγίδας
>300	Μέτρια πιθανότητα ισχυρής καταιγίδας
> 500	Υψηλή πιθανότητα ισχυρής καταιγίδας

6.1.3. Δείκτης S(TT)

Ο δείκτης S(TT) είναι ο τροποποιημένος δείκτης Total Totals (TT) ο οποίος αναπτύχθηκε από τον Miller το 1967 και βρέθηκε πως είναι πιο αποδοτικός στην Ευρώπη παρά στις ΗΠΑ, λόγω μικρότερης έκτασης της θέρμανσης των κατώτερων στρωμάτων. Σε κάποιες μελέτες συμβολίζεται και ως SI. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S(TT) = TT - (T_{700} - Td_{700}) - A \quad (6.3)$$

όπου TT τη τιμή του δείκτη Total Totals, T_{700} και Td_{700} η θερμοκρασία και το σημείο δρόσου στα 700 hPa, και A μια παράμετρος που παίρνει τις ακόλουθες τιμές:

$A = 0$, όταν $T_{850} - T_{500} > 25$

$A = 2$, όταν $T_{850} - T_{500} = 22 - 25$

$A = 6$, όταν $T_{850} - T_{500} < 22$

Το εύρος των τιμών του δείκτη περιγράφεται στον Πίνακα 6.2

Πίνακας 6.2: Εύρος τιμών δείκτη S(TT)

Τιμές δείκτη S(TT)	Περιγραφή
$S(TT) < 39$	Πολύ μικρή πιθανότητα καταιγίδας
$40 < S(TT) < 45$	Μέτρια πιθανότητα καταιγίδας
$S(TT) > 46$	Υψηλή πιθανότητα καταιγίδας

6.1.4. Δείκτης LI (Lifted Index)

Ο δείκτης LI αναπτύχθηκε από τον Galway το 1956 και υπολογίζεται από τη διαφορά της θερμοκρασίας στο επίπεδο των 500 hPa, με τη θερμοκρασία που θα είχε αέρια μάζα αν ανέβαινε αδιαβατικά στο ίδιο επίπεδο. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$LI = (T_{500 \text{ Environmental}}) - (T_{500 \text{ Theoretical Air Parcel}}) \quad (6.4)$$

Όπως φαίνεται και από τη σχέση (6.4), η αστάθεια είναι εντονότερη όσο πιο αρνητικές είναι οι τιμές του δείκτη. Το εύρος των τιμών του δείκτη περιγράφεται στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3: Εύρος τιμών δείκτη LI

Τιμές δείκτη LI	Περιγραφή
$LI > 0$	Μηδενική πιθανότητα καταιγίδας
$0 > LI > -2$	Μικρή πιθανότητα καταιγίδας
$-3 > LI > -5$	Μέτρια πιθανότητα καταιγίδας
$LI < -5$	Υψηλή πιθανότητα καταιγίδας

6.1.5. Δείκτης TT (Total Totals Index)

Ο δείκτης Total Totals αποτελεί το άθροισμα των δεικτών Cross Totals και Vertical Totals και αναπτύχθηκε από τον Miller το 1967. Συνδυάζει την υγρασία και τη θερμοκρασία στο επίπεδο των 850 hPa, μαζί με τη θερμοκρασία στο επίπεδο των 500 hPa. Υπολογίζεται από τη σχέση (6.5) και το εύρος των τιμών του δείκτη περιγράφεται στον Πίνακα 6.4

$$TTI = T_{850} + T_{d850} - 2T_{500} \quad (6.5)$$

Πίνακας 6.4: Εύρος τιμών δείκτη TT

Τιμές δείκτη TT	Περιγραφή
TT < 44	Μηδενική πιθανότητα καταιγίδας
44 < TT > 45	Μεμονωμένες καταιγίδες
46 < TT > 47	Μεμονωμένες καταιγίδες, μικρή πιθανότητα ισχυρής καταιγίδας
48 < TT > 49	Μεμονωμένες καταιγίδες, μεγάλη πιθανότητα ισχυρής καταιγίδας
50 < TT > 51	Τοπικές καταιγίδες, μεμονωμένες ισχυρές καταιγίδες
52 < TT > 55	Τοπικές καταιγίδες, τοπικές ισχυρές καταιγίδες, μικρή πιθανότητα ανεμοστρόβιλου
TT > 56	Τοπικές καταιγίδες, τοπικές ισχυρές καταιγίδες, μεγάλη πιθανότητα ανεμοστρόβιλου

6.1.6. Δείκτης K (K Index)

Ο δείκτης KI δημιουργήθηκε από Whiting και διαμορφώθηκε στην τελική του μορφή από τον George το 1960. Συνδυάζει θερμοκρασία και υγρασία στα επίπεδα των 850, των 700 και των 500 hPa. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700}) \quad (6.6)$$

Πίνακας 6.5: Εύρος τιμών δείκτη KI

Τιμές δείκτη KI	Περιγραφή
KI < 20	Μηδενική πιθανότητα καταιγίδας
20 < KI > 25	Μικρή πιθανότητα μεμονωμένης καταιγίδας
26 < KI > 30	Μεγάλη πιθανότητα μεμονωμένων καταιγίδων
31 < KI > 35	Μεμονωμένες καταιγίδες
36 < KI > 40	Μεμονωμένες καταιγίδες, πιθανότητα για τοπικές καταιγίδες
KI > 40	Τοπικές καταιγίδες

6.1.7. Δείκτης CAPE (Convective Available Potential Energy)

Ο δείκτης CAPE είναι το έργο που απαιτείται για να ανυψωθεί μια αέρια μάζα. Συνήθως τα σημεία που υπολογίζεται είναι η βάση του νέφους (LFC) και η κορυφή του (Equilibrium Level). Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$CAPE = g \int_{z_1}^{z_2} \left(\frac{T_v \text{ parcel} - T_v \text{ environment}}{T_v \text{ environment}} \right) dz \quad (6.7)$$

όπου T_v η δυνητική θερμοκρασία της αέριας μάζας (parcel) και του περιβάλλοντος (environment).

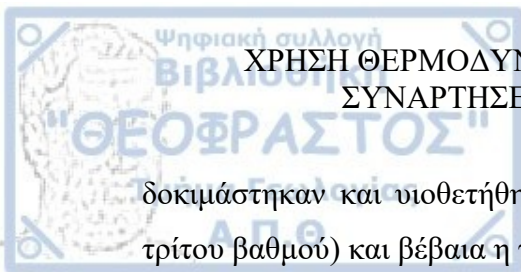
Πίνακας 6.6: Εύρος τιμών δείκτη CAPE

Τιμές CAPE	Περιγραφή
CAPE < 300	Μικρή έως μηδενική πιθανότητα καταιγίδας
300 < CAPE > 1000	Μικρή πιθανότητα καταιγίδων
1000 < CAPE > 2500	Μέτρια πιθανότητα καταιγίδων
CAPE > 2500	Υψηλή πιθανότητα καταιγίδων

6.2. Υπολογισμός της συνάρτησης

Για να υπολογιστεί η συνάρτηση εκτίμησης-υπολογισμού της πιθανής βροχόπτωσης, εφαρμόστηκε η μέθοδος της πολλαπλής παλινδρόμησης. Ως εξαρτημένη μεταβλητή τέθηκε η μέση ημερήσια βροχόπτωση όπως υπολογίστηκε από τους 37 σταθμούς (στα διαγράμματα που ακολουθούν, ονομάζεται AVRGR). Ως ανεξάρτητες μεταβλητές θεωρήθηκαν οι παράμετροι που περιγράφηκαν στις παραγράφους 6.1.1 έως 6.1.7.

Η πρώτη προσπάθεια σύνθεσης αυτών έγινε μέσω γραμμικής παλινδρόμησης-συσχέτισης. Στην συνέχεια έγινε προσπάθεια να βρεθεί η βέλτιστη συσχέτιση των ανεξάρτητων μεταβλητών με την εξαρτημένη, αναζητώντας διαφορετικούς αλγόριθμους-εκφράσεις, με στόχο την καλύτερη αντιπροσώπευση και επομένως μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης R (Pearson correlation coefficient). Έτσι,



ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

δοκιμάστηκαν και υιοθετήθηκαν: η λογαριθμική, η εκθετική, η πολυωνυμική (μέχρι τρίτου βαθμού) και βέβαια η γραμμική.

Η τελική προσδοκώμενη εκτίμηση-υπολογισμός της εκτιμώμενης βροχόπτωσης θα προέρχεται από τη γενική μορφή της σχέσης (6.8), ως ένα συνθετικό αποτέλεσμα συνεισφοράς των εξαρτημένων μεταβλητών προς την εξαρτημένη μεταβλητή:

$$EP = \sum_{i=1}^n w_i (a_i + b_i x) \quad (6.8)$$

όπου EP η εκτιμώμενη βροχόπτωση (Estimated Precipitation), $w_i = \frac{R_i}{\sum R_i}$ ο συντελεστής βαρύτητας της συνάρτησης της κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής προς την εξαρτημένη, a_i, b_i οι συντελεστές των γραμμικών, ή μη γραμμικών, εξισώσεων και R_i οι συντελεστές συσχέτισης της εξαρτημένης μεταβλητής με τις ανεξάρτητες.

Η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης εφαρμόστηκε για τον κάθε συνοπτικό τύπο κυκλοφορίας ξεχωριστά, με στόχο τη δημιουργία μιας συνάρτησης για την εμφάνιση του καθενός τύπου. Από τους επτά συνοπτικούς τύπους κυκλοφορίας που αναλύθηκαν, οι τύποι κυκλοφορίας NW και ZON κρίθηκε σκόπιμο να μην χρησιμοποιηθούν, καθώς παρουσίασαν πολύ χαμηλές αποδόσεις, είτε απευθείας με την βροχόπτωση, ως μέρες βροχής, είτε με τα ποσά βροχόπτωσης που καταγράφηκαν με την εμφάνιση τους, αλλά και με την μικρή καταγραφή τις μέρες εμφάνισης τους νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης και καταιγίδων.

Στις ακόλουθες σχέσεις, (6.9) έως και (6.13), τα ακρωνύμια αντιστοιχούν στην εξαρτημένη μεταβλητή, EP = Estimated Precipitation, με την παρένθεση να δείχνει σε ποιο συνοπτικό τύπο κυκλοφορίας αντιστοιχεί. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που καταγράφονται και χρησιμοποιούνται, είναι:

PW = precipitable water,

SWEAT = Sever WEATHER Threat index,

S(TT) = S index Total Totals based,

LI = Lifted index,

TT = Total Totals index,

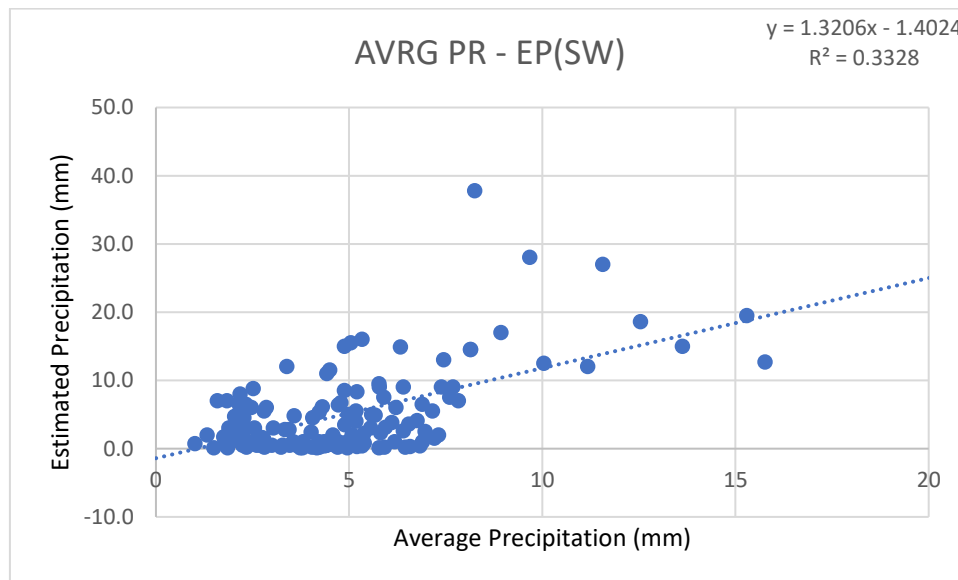
KI = K index,

CAPE= Surface based Convective Available Potential Energy.

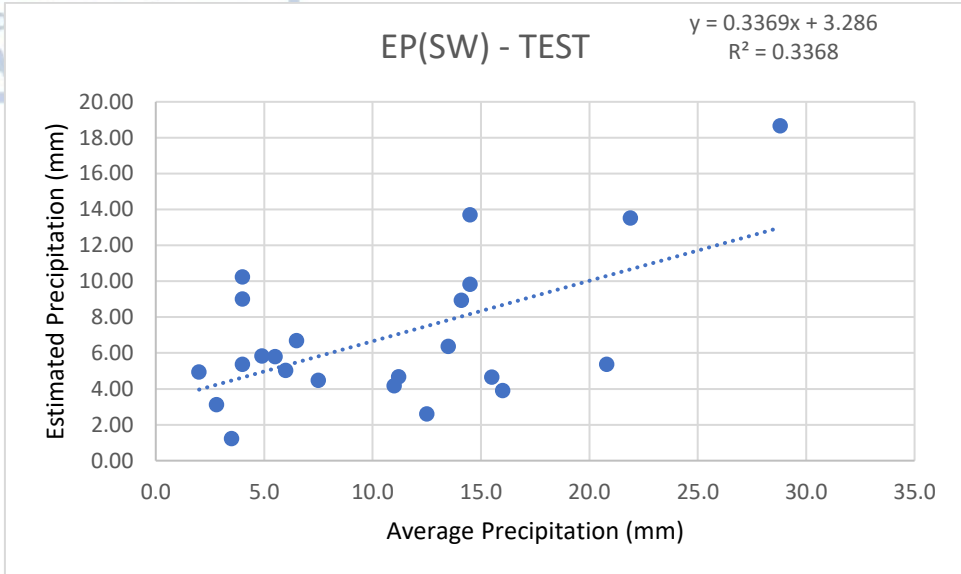
Για την επαλήθευση των συναρτήσεων χρησιμοποιήθηκε ένα πλήθος τιμών των δεδομένων, της τάξης του 10%, για κάθε συνοπτικό τύπο κυκλοφορίας, το οποίο δείγμα, δεν συμπεριλήφθηκε στον υπολογισμό των συντελεστών συσχέτισης και των αντίστοιχων συναρτήσεων. Τα αποτελέσματα, τόσο των διαγραμμάτων συσχέτισης της καταγεγραμμένης βροχόπτωσης με την υπολογιζόμενη εκτιμώμενη βροχόπτωση, όσο και των διαγραμμάτων του πλήθους τιμών που απομονώθηκαν για επαλήθευση, φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.

Ακολουθούν οι πέντε συναρτήσεις για τους τύπους SW, L1, L2, CLO και CUT, αντίστοιχα, και τα διαγράμματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης, τόσο του διερευνητικού δείγματος, όσο και του δείγματος ελέγχου (10% των δεδομένων).

$$\begin{aligned}
 EP(SW) = & 0.0433PW^2 - 0.3076PW - 2 \cdot 10^{-6} SWEAT^3 + 0.0012SWEAT^2 - \\
 & 0.1665SWEAT + 0.0283S(TT)^2 - 1.5296S(TT) - 0.0585LI^3 + 0.5973LI^2 - \\
 & 0.8752LI + 0.0408TT^2 - 2.7506TT + 0.0359e^{0.2047KI} - 6 \cdot 10^{-6} CAPE^2 + \\
 & 0.0227CAPE + 72.3884
 \end{aligned} \quad (6.9)$$

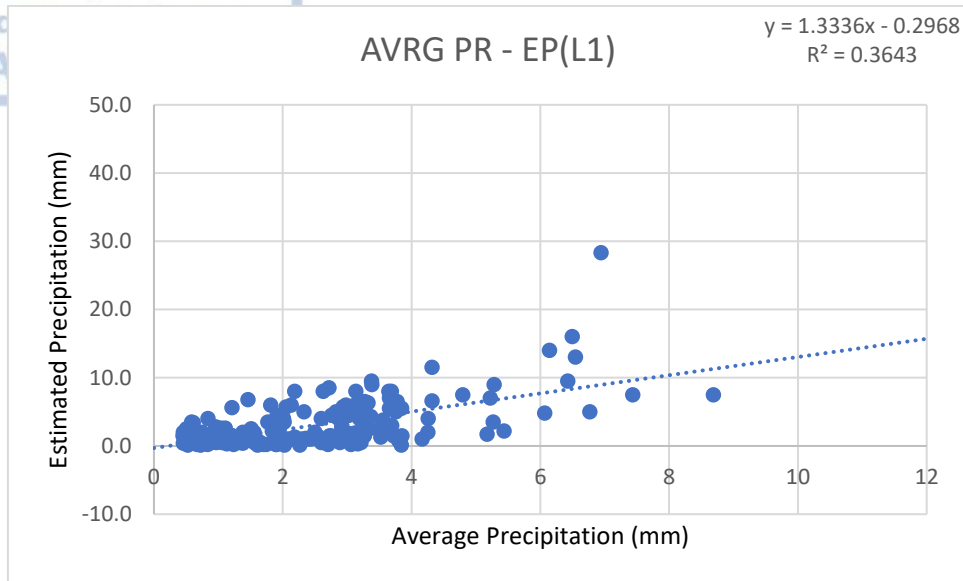


Σχήμα 6.1: Συσχέτιση του διερευνητικού δείγματος της καταγεγραμμένης βροχόπτωσης με αυτήν που υπολογίστηκε από τη συνάρτηση (6.9) για το συνοπτικό τύπο κυκλοφορίας SW.

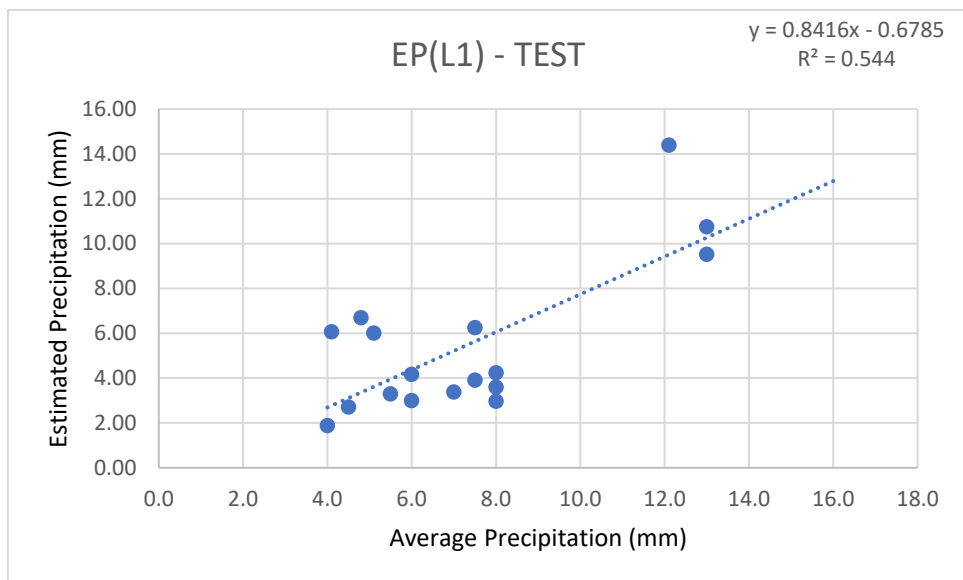


Σχήμα 6.2: Συσχέτιση του επιβεβαιωτικού δείγματος της καταγεγραμμένης βροχόπτωσης με αυτήν που υπολογίστηκε από τη συνάρτηση (6.9) για το συνοπτικό τύπο κυκλοφορίας SW

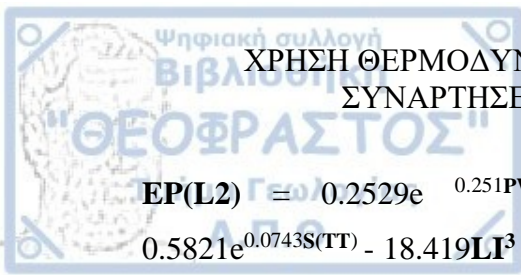
$$\begin{aligned}
 EP(L1) = & 0.0244PW^2 - 0.4316PW + 5 \cdot 10^{-8}SWEAT^3 + 0.0002SWEAT^2 - \\
 & 0.0244SWEAT + 0.0073e^{0.1334S(TT)} - 1.3695LI + 4 \cdot 10^{-5}e^{0.2328TT} + 0.0306e^{0.1862KI} - \\
 & 1 \cdot 10^{-6}CAPE^2 + 0.0062CAPE + 4.9737
 \end{aligned}
 \tag{6.10}$$



Σχήμα 6.3: Συσχέτιση του διερευνητικού δείγματος της καταγεγραμμένης βροχόπτωσης με αυτήν που υπολογίστηκε από τη συνάρτηση (6.10) για το συνοπτικό τύπο κυκλοφορίας L1

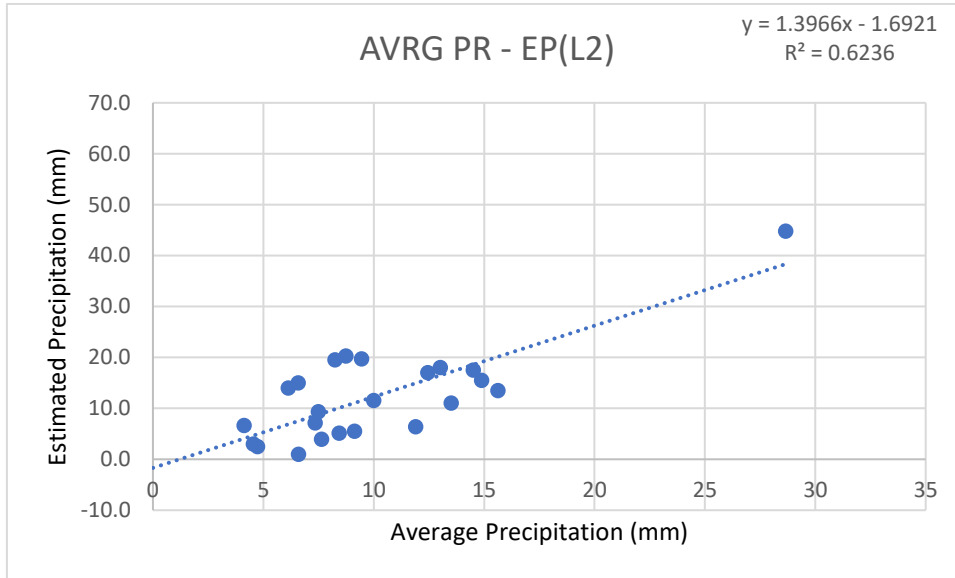


Σχήμα 6.4: Συσχέτιση του επιβεβαιωτικού δείγματος της καταγεγραμμένης βροχόπτωσης με αυτήν που υπολογίστηκε από τη συνάρτηση (6.10) για το συνοπτικό τύπο κυκλοφορίας L1

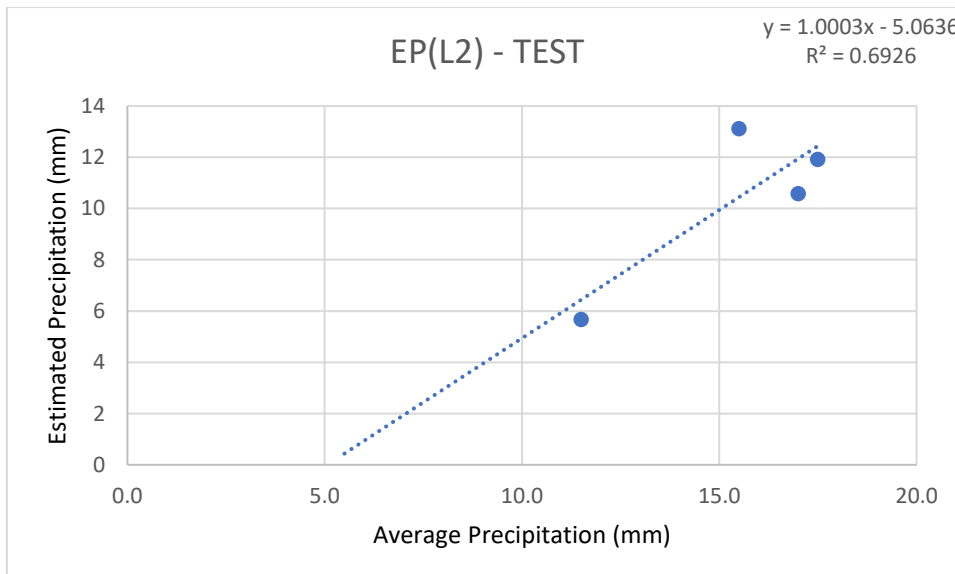


ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

$$EP(L2) = 0.2529e^{0.251PW} + 0.0008SWEAT^2 - 0.0981SWEAT + 0.5821e^{0.0743S(TT)} - 18.419LI^3 - 159.76LI^2 - 443.51LI + 0.1836TT^2 - 15.835TT + 0.0765KI^2 - 2.0547KI + 4.2068e^{0.004CAPE} - 42.0873 \quad (6.11)$$



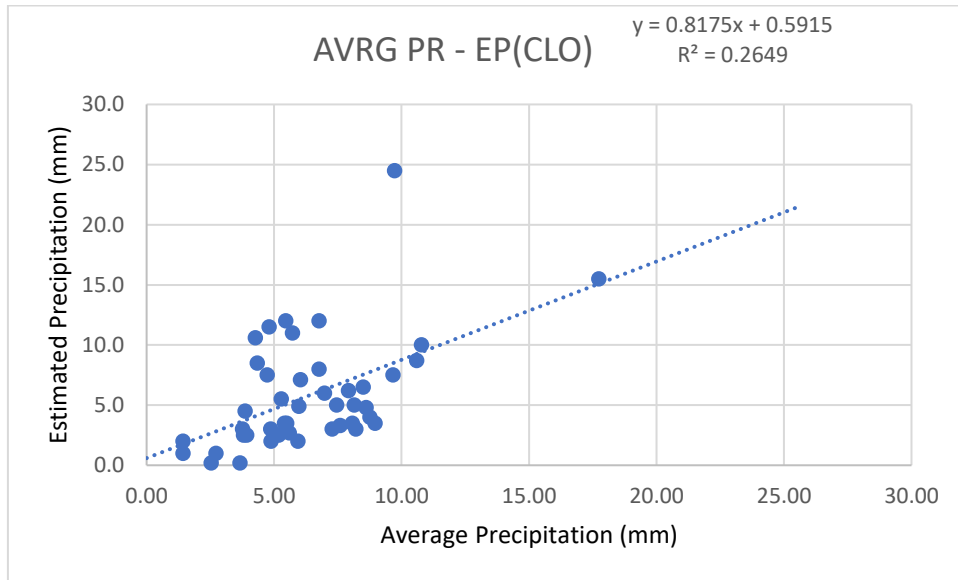
Σχήμα 6.5: Συσχέτιση του διερευνητικού δείγματος της καταγεγραμμένης βροχόπτωσης με αυτήν που υπολογίστηκε από τη συνάρτηση (6.11) για το συνοπτικό τύπο κυκλοφορίας L2.



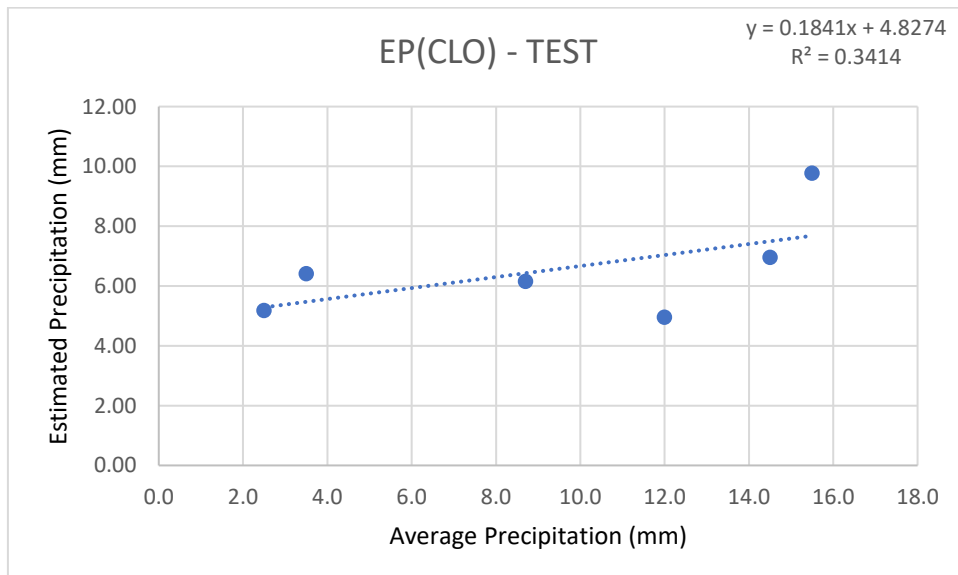
Σχήμα 6.6: Συσχέτιση του επιβεβαιωτικού δείγματος της καταγεγραμμένης βροχόπτωσης με αυτήν που υπολογίστηκε από τη συνάρτηση (6.11) για το συνοπτικό τύπο κυκλοφορίας L2.

ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ
 ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

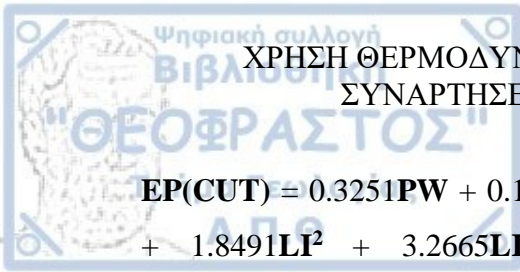
$$EP(CLO) = 0.0021PW^3 - 0.1141PW^2 + 2.3606PW + 0.394e^{0.0156SWEAT} + 0.7921S(TT) - 1.4132LI + 1*10^{-6}e^{0.3071TT} + 0.0514KI^2 - 1.4405KI + 1*10^{-5}CAPE^2 - 0.0003CAPE - 21.6127 \quad (6.12)$$



Σχήμα 6.7: Συσχέτιση του διερευνητικού δείγματος της καταγεγραμμένης βροχόπτωσης με αυτήν που υπολογίστηκε από τη συνάρτηση (6.12) για το συνοπτικό τύπο κυκλοφορίας CLO.

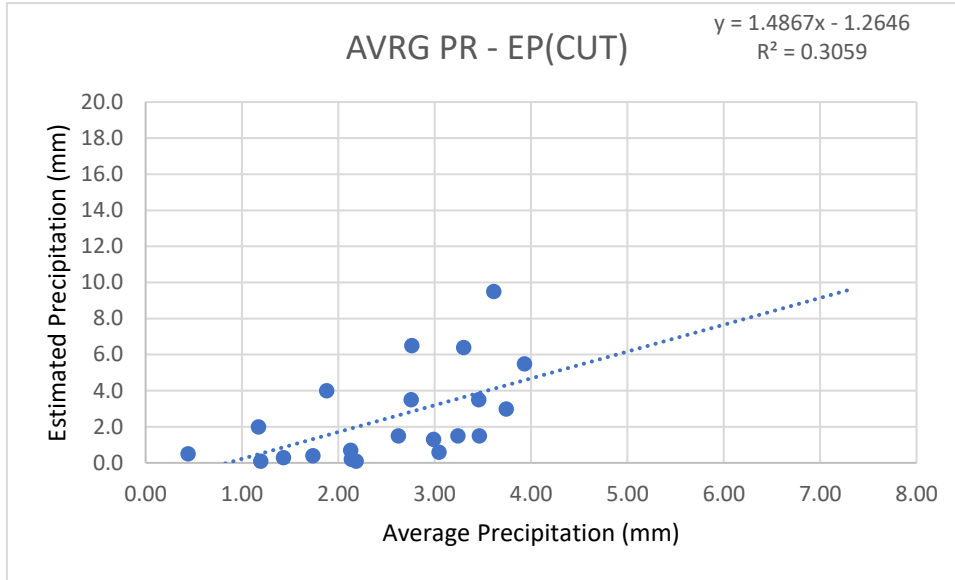


Σχήμα 6.8: Συσχέτιση του επιβεβαιωτικού δείγματος της καταγεγραμμένης βροχόπτωσης με αυτήν που υπολογίστηκε από τη συνάρτηση (6.12) για το συνοπτικό τύπο κυκλοφορίας CLO.

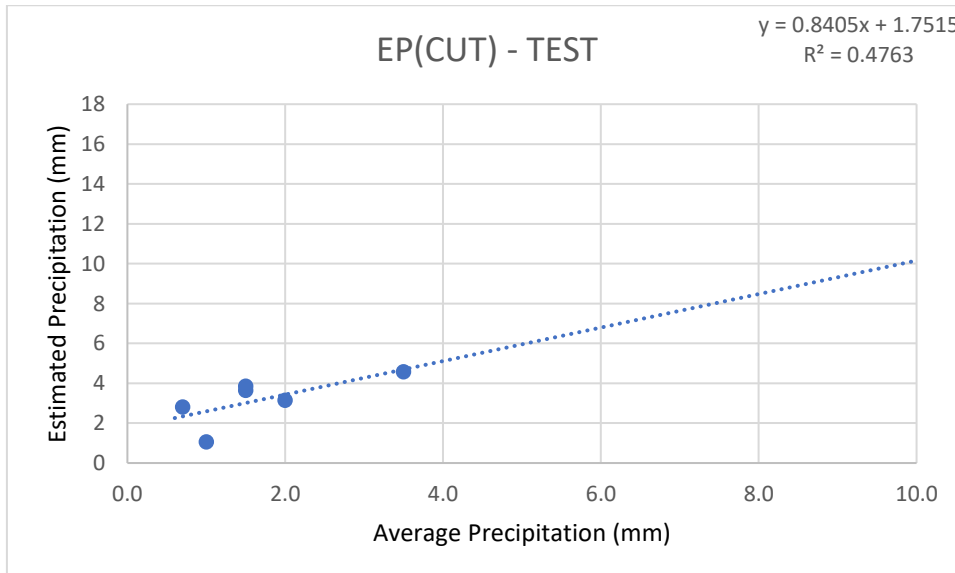


ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

$$EP(CUT) = 0.3251PW + 0.1454e^{0.0147SWEAT} + 8 \cdot 10^{-5}e^{0.2347S(TT + 0.2136LI^3 + 1.8491LI^2 + 3.2665LI + 0.3287TT + 0.031KI^2 - 1.1397KI + 0.2418e^{0.0026CAPE} - 5.8588} \quad (6.13)$$



Σχήμα 6.9: Συσχέτιση του διερευνητικού δείγματος της καταγεγραμμένης βροχόπτωσης με αυτήν που υπολογίστηκε από τη συνάρτηση (6.13) για το συνοπτικό τύπο κυκλοφορίας CUT.



Σχήμα 6.10: Συσχέτιση του επιβεβαιωτικού δείγματος της καταγεγραμμένης βροχόπτωσης με αυτήν που υπολογίστηκε από τη συνάρτηση (6.13) για το συνοπτικό τύπο κυκλοφορίας CUT.

Πίνακας 6.7 Συντελεστές συσχέτισης του πλήθους των δεδομένων με τα δεδομένα ελέγχου.

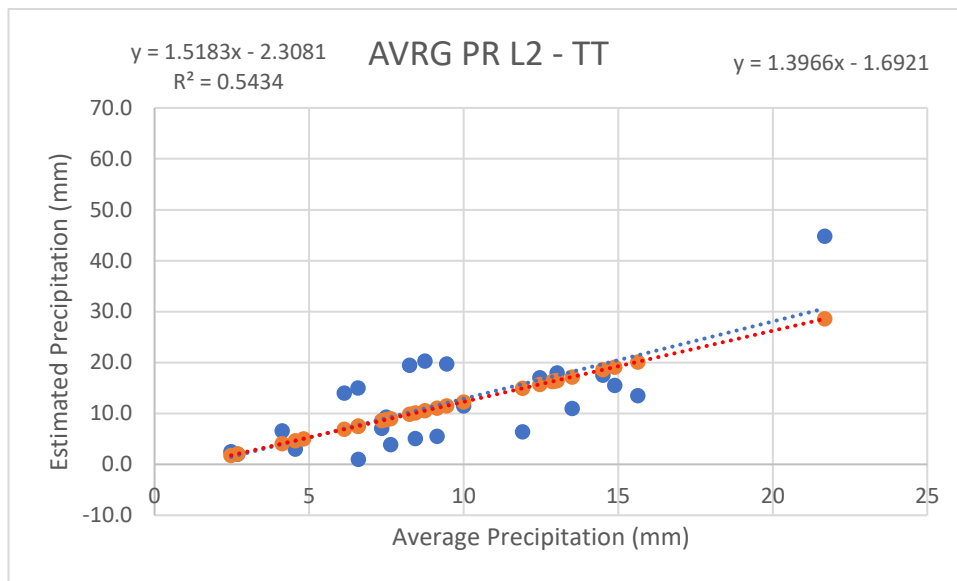
AVRG PR – EP	R (sample)	R (test)
EP (SW)	0.577	0.580
EP (L1)	0.604	0.738
EP (L2)	0.789	0.832
EP (CLO)	0.515	0.584
EP (CUT)	0.553	0.690

Στον Πίνακα 6.7 καταγράφονται οι συντελεστές συσχέτισης R, όπως υπολογίστηκαν από τις συναρτήσεις για το πλήθος των τιμών R (sample) που χρησιμοποιήθηκαν στην δημιουργία των εξισώσεων (διερευνητικό δείγμα), και των συντελεστών R, όπως προέκυψαν από τις τιμές που εξαιρέθηκαν για να χρησιμοποιηθούν για έλεγχο (επιβεβαιωτικό δείγμα), για τον κάθε το συνοπτικό τύπο κυκλοφορίας. Οι περισσότερες τιμές είναι πολύ κοντά (μικρή διαφορά), ενώ και οι υπόλοιπες δεν διαφέρουν πάνω από 0.15 (περίπου διαφορά της τάξης 10 με 15%), που οδηγεί στο συμπέρασμα για την ορθότητα της επαλήθευσης των συναρτήσεων υπολογισμού της βροχόπτωσης. Επίσης από τον υπολογισμό της σημαντικότητας των σχέσεων υπολογίστηκε και η τιμή p value, με την εμφάνιση αρκετά θετικών αποτελεσμάτων. Ενδεικτικό είναι το παράδειγμα για τον τύπο L1 με $p = 0,005$.

6.3. Έλεγχος ευαισθησίας – Επιμέρους συμπεράσματα

Για την περαιτέρω ευστάθεια και κατ' επέκταση ορθότητα των συναρτήσεων, έγινε ένας έλεγχος ευαισθησίας της κάθε παραμέτρου χρησιμοποιώντας τον εμπειρικό κανόνα των τριών αποκλίσεων. Βάση αυτού, σε μια κανονική κατανομή το 68%, το 95% και το 99.7% των τιμών περιλαμβάνεται σε μια, δύο και τρεις τυπικές αποκλίσεις, αντίστοιχα. Έτσι, ο έλεγχος ευαισθησίας της κάθε μιας ανεξάρτητης μεταβλητής έγινε για το 95% του δείγματος, δηλαδή για πλήθος τιμών που βρίσκονταν εντός του εύρους των 2 τυπικών αποκλίσεων. Κρατώντας σταθερές τις 6 από τις 7 ανεξάρτητες μεταβλητές, έγινε ο υπολογισμός της εξαρτημένης μεταβλητής, μεταβάλλοντας την

άλλη ανεξάρτητη μεταβλητή κάθε φορά. Έτσι, εξαιρέθηκαν από το σύνολο των τιμών της κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής οι τιμές που ήταν μεγαλύτερες, ή και μικρότερες από δυο τυπικές αποκλίσεις (95%), και συγκρίθηκε η μεταβολή του αποτελέσματος με ολόκληρο το δείγμα. Από τους ελέγχους που εκπονήθηκαν οι περισσότερες συναρτήσεις παρέμειναν αμετάβλητες αλλά και μερικές αποκλίσεις που παρουσιάστηκαν ήταν πολύ μικρές, έως αμελητέες. Κάποιοι δείκτες (π.χ. TT και LI) φάνηκε ότι επηρέαζαν την συνάρτηση λίγο περισσότερο από τους άλλους, και αυτό συνέβαινε για κάποιους συνοπτικούς τύπους κυκλοφορίας (π.χ. L1, L2, CUT).



Σχήμα 6.11: Η συνάρτηση υπολογισμού της βροχόπτωσης για τον τύπο L2 εξαιρουμένου του δείκτη Total Totals.

Στο σχήμα 6.11 παρουσιάζεται η απόκλιση που παρουσιάζει η συνάρτηση υπολογισμού της βροχόπτωσης για τον τύπο L2, με την εξαίρεση του δείκτη Total Totals, για το 95% του δείγματος (2 τυπικές αποκλίσεις). Με μπλε χρώμα είναι η συνάρτηση χωρίς τον TT και με κόκκινο η συνάρτηση όπως υπολογίστηκε αρχικά και με τους υπόλοιπους δείκτες αστάθειας. Παρουσιάζεται μια μικρή υπερεκτίμηση στη βροχόπτωση η οποία όμως θεωρείται αμελητέα. Για τον συγκεκριμένο τύπο οι υπόλοιποι έλεγχοι δεν παρουσίασαν καμία μεταβολή. Με βάση την παραπάνω διαδικασία ελέγχου ευαισθησίας εκτιμήθηκε η ορθότητα, των συναρτήσεων που υπολογίστηκαν, και συνεπώς αποφασίστηκε η χρήση των συναρτήσεων όπως αυτές υπολογίστηκαν, χωρίς καμία επιπρόσθετη διόρθωση.



ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ
ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΣΥΝΟΨΗ – ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διατριβή έγινε, με απώτερο σκοπό να εξεταστεί κατά πόσον μπορεί να εφαρμοστεί ένα πρόγραμμα τροποποίησης των καιρικών συνθηκών με στόχο την αύξηση της βροχόπτωσης, στην περιοχή της Κύπρου. Οι ανάγκες του πληθυσμού, τόσο για ύδρευση, όσο και για άρδευση, είναι αυξανόμενες, αλλά και οι απαιτήσεις του φυσικού περιβάλλοντος, είτε πρόκειται για τα δάση, είτε τους υπόλοιπους υδροβιότοπους, συμβάλλουν στην αναζήτηση τεχνολογιών για εμπλουτισμό του υδροφόρου ορίζοντα και των υδατικών αποθεμάτων.

Η τροποποίηση του καιρού για αύξηση της βροχόπτωσης είναι βασισμένη σε δύο αρχές (Braham 1986). Η πρώτη, ονομαζόμενη και στατικός τόπος σποράς, βασίζεται στην δημιουργία βροχής από την περιεκτικότητα του νέφους σε πυρήνες συμπύκνωσης. Δοθείσης της πεπερασμένης ποσότητας υδρατμών, η περιορισμένη ποσότητα φυσικών πυρήνων σε ένα νέφος, έχει ως αποτέλεσμα την ανάλογη δημιουργία βροχόπτωσης, και με τη δυνητική εισαγωγή στο νέφος τεχνητών πυρήνων, θα μπορούσε να αυξηθεί και η ποσότητα βροχόπτωσης. Η δεύτερη αρχή, ονομαζόμενη και δυναμικός τρόπος σποράς, βασίζεται στη διαδικασία της μετατροπής του υπέρψυχρου νερού (supercooled liquid water) σε παγοκρυστάλλους, που οδηγεί σε απελευθέρωση λανθάνουσας ενέργειας, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ανοδικών (και καθοδικών) κινήσεων, αύξηση των διαστάσεων του νέφους και κατ' επέκταση τη δημιουργία και παραγωγή περισσότερης βροχόπτωσης.

Όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3 η τροποποίηση των καιρικών συνθηκών ξεκίνησε στα μέσα του 20^{ου} αιώνα και ακολούθησαν δεκαετίες με πειραματισμούς για την απόδειξη, αλλά και την εξέλιξή της. Τα προγράμματα που εφαρμόστηκαν σε διάφορες περιοχές του πλανήτη, δεν κατάφεραν να παρουσιάσουν αδιαμφισβήτητα στοιχεία για την αποτελεσματικότητα της τροποποίησης για την αύξηση της

βροχόπτωσης, παρά το γεγονός, ότι, σε αρκετές περιπτώσεις, αυτά ήταν και αξιοσημείωτα, αλλά και εντυπωσιακά.

Τα προγράμματα στατικού τρόπου σποράς που έγιναν στο Ισραήλ μπορεί να μην εμφάνισαν στο σύνολο τους την απαραίτητη στατιστική σημαντικότητα για την απόδειξη τους, αλλά από φυσικής πλευράς, η αύξηση στη βροχόπτωση της τάξης του 15% δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως αμελητέα.

Τα προγράμματα δυναμικού τρόπου σποράς, παρόλο που δεν πραγματοποιήθηκαν όλα για να αυξήσουν την βροχόπτωση, παρουσίασαν επίσης αξιοσημείωτα αποτελέσματα.

Τα προγράμματα σποράς ψυχρών νεφών που έγιναν σε Τέξας, Καραϊβική και Ταϊλάνδη, παρουσίασαν αύξηση στο ύψος των νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης, κάτι που πιθανό να οφείλεται στην ενίσχυση του ανοδικού ρεύματος, με τα δεδομένα των μετεωρολογικών ραντάρ να δείχνουν ανακλάσεις, που αντιστοιχούν σε πολύ ισχυρές βροχοπτώσεις.

Παρόλα τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα των διερευνητικών (exploratory) προγραμμάτων, οι αυστηρές κριτικές που ακολούθησαν, υποστηρίζουν πως ακόμα δεν έχει βρεθεί ισχυρή στατιστική απόδειξη, και πως απαιτούνται επιβεβαιωτικά (confirmatory) προγράμματα, καθώς και περαιτέρω μετρήσεις για την πλήρη απόδειξη της αύξησης της βροχόπτωσης, ως αποτέλεσμα της τροποποίησης των νεφών. Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από τις αναλύσεις που διενεργήθηκαν από διακεκριμένους φορείς, όπως: Advisory Committee on Weather Control, National Academy of Sciences και το Weather Modification Advisory Board, είναι ότι, η σωστή εφαρμογή της επιστήμης της τροποποίησης του καιρού μέσω της σπορά των νεφών, αν και μη αποδεδειγμένη πλήρως, είναι πολλά υποσχόμενη και αξίζει να συνεχιστεί, πάντοτε με την υποστήριξη της επιστήμης.

Για να εξεταστεί αν στην Κύπρο υπάρχουν δυνατότητες τροποποιήσιμων καιρικών συστημάτων και συνθηκών, αναλύθηκε η δεκαετία από το 2000 μέχρι το 2009, και ταξινομήθηκαν οι συνοπτικοί τύποι κυκλοφορίας, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από ασταθείς συνθήκες, και επομένως δυνητικότητα δημιουργίας νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης. Από τις 3653 ημέρες που περιλαμβάνονται σε αυτή τη περίοδο, το 51% περίπου ταξινομήθηκε σε έναν από τους επτά (7) συνοπτικούς τύπους κυκλοφορίας, και στη συνέχεια έγινε ανάλυση του κάθε τύπου σε σχέση με την εμφάνιση και



καταμέτρηση βροχής (>0.2 mm), αλλά και με την παρουσία νεφών έντονης κατακόρυφης ανάπτυξης. Από αυτήν την ανάλυση προέκυψε πως οι τύποι κυκλοφορίας ZON και NW, παρουσιάζουν το μικρότερο ποσοστό ημερών βροχής, αλλά και τις λιγότερες ημέρες εμφάνισης καταιγίδας, ή και νεφών έντονης κατακόρυφης ανάπτυξης. Αντίθετα, οι συνοπτικοί τύποι κυκλοφορίας L2, CLO και CUT, αν και έχουν μικρότερη συχνότητα εμφάνισης κατά την περίοδο μελέτης, εμφανίζουν τα μεγαλύτερα ποσοστά βροχής, τα μεγαλύτερα ποσοστά νεφών έντονων κατακόρυφων αναπτύξεων, καθώς και τις εντονότερες συνθήκες αστάθειας. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του συνοπτικού τύπου L2, όπου καταγράφηκε καταιγίδα σε όλες τις ημέρες εμφάνισής του. Οι πιο συχνά εμφανιζόμενοι συνοπτικοί τύποι κυκλοφορίας είναι οι SW και L1, οι οποίοι εμφανίζονται συνολικά σε περίπου 70% των ταξινομημένων ημερών, δηλαδή σε ποσοστό περίπου 35% ο καθένας. Αρκετά υψηλά είναι και τα ποσοστά καταγραφής βροχής σε αυτούς τους συνοπτικούς τύπους, όπως και η εμφάνιση καταιγίδων.

Όσον αφορά στην περιοδικότητα και στην μηνιαία κατανομή των συνοπτικών τύπων κυκλοφορίας στο έτος, όπως ήταν αναμενόμενο, οι τρεις καλοκαιρινοί μήνες εμφανίζουν τα χαμηλότερα ποσοστά. Για τους υπόλοιπους μήνες δεν παρουσιάζεται κάποιο εμφανές μοτίβο. Οι πιο συχνά εμφανιζόμενοι τύποι είναι οι SW και L1, που παρουσιάζονται καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, σε ποσοστά που κυμαίνονται από 8% μέχρι και 13%, εξαιρουμένων των μηνών Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πως, μια δυνητικά καλή περίοδος εφαρμογής ενός προγράμματος αύξησης βροχής στην Κύπρο θα ήταν οι μη καλοκαιρινοί μήνες, όπου παρατηρείται και το μεγαλύτερο ποσοστό εμφάνισης ευνοϊκών, για τροποποίηση του καιρού, καιρικών συστημάτων.

Από την ανάλυση των συνθηκών ξηρασίας και τον υπολογισμό του δείκτη PDSI, η γενική εικόνα παρουσιάζει μια τάση προς ελαφρώς ξηρότερες καταστάσεις. Αυτό φαίνεται και από την τάση του δείκτη στους περισσότερους από τους 6 σταθμούς που υπολογίστηκε, αλλά και από την μέση τιμή ανά μήνα, όπου οι περισσότεροι μήνες παρουσιάζουν αρνητικές τιμές, υποδηλώνοντας ξηρότερες καταστάσεις.

Ένα άλλο συμπέρασμα που προέκυψε από τα διαγράμματα των 6 μετεωρολογικών σταθμών είναι, ότι, στα 25 περίπου χρόνια που μελετήθηκαν, παρουσιάζονται περίοδοι με αρκετές θετικές τιμές, δηλαδή έτη που χαρακτηρίστηκαν από πολυομβρία. Αυτό κάνει πιο επιτακτική τη δυνητικότητα εφαρμογής ενός

προγράμματος αύξησης βροχής στην Κύπρο. Τονίζεται ότι, οι περίοδοι πολυομβρίας πρέπει να εκμεταλλεύονται στο μεγαλύτερο βαθμό, ώστε να αποταμιεύονται τα μεγαλύτερα ποσά νερού, διότι πάνω από το 90% των ποταμών και των χείμαρρων του νησιού καταλήγει σε φράγματα περισυλλογής και αποταμίευσης του νερού, δηλαδή μια δυναμική κατάσταση σωστής διαχείρισης και χρήσης του νερού σε περιόδους ξηρασίας.

Δημιουργήθηκαν, ελέγχθηκαν και αξιολογήθηκαν συναρτήσεις εκτίμησης-υπολογισμού για τον κάθε συνοπτικό τύπο κυκλοφορίας, για τα δέκα (10) χρόνια μελέτης στην Κύπρο. Οι συναρτήσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως προγνωστικά εργαλεία για τη διαδικασία δυνητικού σχεδιασμού προγράμματος αύξησης βροχής στην Κύπρο, αλλά και κατά την περίοδο εφαρμογής αυτού. Εδώ, θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν, πως οι εν λόγω συναρτήσεις δημιουργήθηκαν με τα υφιστάμενα διαθέσιμα εργαλεία, δηλαδή τα δεδομένα που προέκυψαν από την ανάλυση των ραδιοβλίσεων της κάθε ημέρας. Όμως, το βασικότερο εργαλείο στην παρακολούθηση του σχηματισμού και εξέλιξης της βροχόπτωσης από τα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης, το ραντάρ, δεν ήταν διαθέσιμο κατά την διάρκεια της ανάλυσης και συγγραφής της παρούσας διατριβής, καθώς εγκαταστάθηκε σε δοκιμαστική βάση το 2017, και τα δεδομένα του μετά το 2018, δεν είχαν ακόμη ψηφιοποιηθεί. Είναι όμως στους στόχους της εξέλιξης της παρούσας έρευνας, η συμπερίληψη των δεδομένων από το ραντάρ καιρού, που πιστεύεται ότι θα βελτιώσει την ακρίβεια των συναρτήσεων και θα προσδώσει μια πιο ολοκληρωμένη και συγχρόνως λεπτομερέστερη εικόνα του όλου εγχειρήματος.

Ένα από τα σημαντικότερα θέματα στην εφαρμογή ενός προγράμματος αύξησης βροχής είναι φυσικά και το κόστος του. Τα οφέλη της βροχής είναι πολλά, πρέπει όμως να υπολογιστεί και το κόστος δημιουργίας και εφαρμογής ενός τέτοιου προγράμματος, όπως και η επιστημονική αξιολόγησή του. Σύμφωνα με τον Silverman (1990), αλλά και πολλών άλλων μετέπειτα ερευνητών της βιβλιογραφίας, οι πληροφορίες σχετικά με την αποτελεσματικότητα ενός επιστημονικά σχεδιασμένου προγράμματος αύξησης βροχής μέσου σποράς των νεφών, δίδονται από τρεις παραμέτρους:

α: το επίπεδο σπουδαιότητας αξιολόγησης του προγράμματος, που ορίζεται ως η πιθανότητα απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης, όταν στην πραγματικότητα είναι αλήθεια.



π: η ισχύς αξιολόγησης του προγράμματος, που ορίζεται ως η πιθανότητα σωστής απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης. Είναι ίσο με το $1-\beta$, όπου β είναι η πιθανότητα αποδοχής της μηδενικής υπόθεσης, ενώ στην πραγματικότητα είναι ψευδής, και

θ : η εκτιμώμενη τιμή μιας πολλαπλασιαστικής αύξησης στη βροχόπτωση.

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω τιμές δημιουργείται μια έκφραση "σταθμισμένου κινδύνου" για την προσέγγιση της ανάλυσης κόστους – οφέλους, που να αποδεικνύει τη χρησιμότητα του προγράμματος αύξησης βροχής. Έτσι, πρώτα σχηματίζεται μια έκφραση για τη μαθηματική προσδοκία του οφέλους P , από τη συμμετοχή στο πρόγραμμα αύξησης βροχής, που δίδεται από τη σχέση (7.1).

$$P = \pi (\alpha, \theta) (B - C) - \alpha C \quad 7.1$$

όπου το B είναι τα οφέλη του προγράμματος και το C είναι το κόστος του προγράμματος. Διαιρώντας και τις δύο πλευρές της (7.1) με C , λαμβάνεται μια μορφή που περιλαμβάνει τον λόγο κόστους - οφέλους.

$$P^{\circ} = \pi (\alpha, \theta) (V - 1) - \alpha \quad 7.2$$

όπου $P^{\circ} = P / C$, ο λόγος κέρδους-κόστους και $V = B / C$, ο λόγος κόστους - οφέλους. Η έκφραση για τον «σταθμισμένο κίνδυνο» λόγο κόστους-οφέλους, V° λαμβάνεται αντικαθιστώντας στη σχέση (7.2) τη θεμελιώδη σχέση $V^{\circ} = P^{\circ} + 1$

$$V^{\circ} = \pi (\alpha, \theta) (V - 1) - \alpha + 1 \quad 7.3$$

Μπορεί να φανεί από την έκφραση (7.3) ότι ο λόγος κόστους - οφέλους "σταθμισμένου κινδύνου" V° , θα είναι πάντα μικρότερος από τον υπολογισμένο λόγο σχέσης κόστους-οφέλους V , αρκεί να υπάρχει αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα της σποράς. Εάν και όταν η τεχνολογία σχετικά με την αύξηση της βροχόπτωσης φτάσει σε μια κατάσταση βεβαιότητας, δηλαδή το αποτέλεσμα της σποράς νέφους θα είναι γνωστό με ακρίβεια, τότε: $\pi (\alpha, \theta) = 1$ και $\alpha = 0$. Σε αυτήν την περίπτωση δεν θα

υπάρχει επιστημονικός κίνδυνος στην εφαρμογή της αύξησης της βροχόπτωσης οπότε
 $V^o = V$.

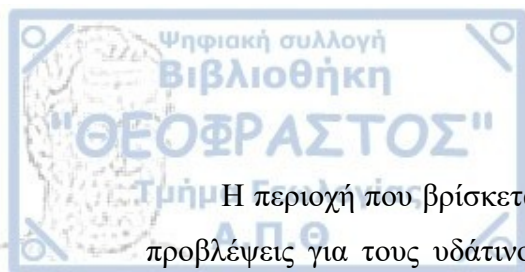
Η αξιολόγηση των περισσότερων προγραμμάτων αύξησης βροχής επικεντρώνεται κυρίως στα α και θ , και σε μικρότερο βαθμό στο π (ή στο β). Οι επιστήμονες, προσπαθούν συνήθως να μεγιστοποιούν το επίπεδο εμπιστοσύνης στη φυσική αποτελεσματικότητα της επέμβασης, δηλαδή στη διαδικασία της σποράς των νεφών.

Τέλος είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι για τυπικές τιμές σχέσεων κόστους - οφέλους για προγράμματα αύξησης της βροχόπτωσης ($V = 3$ έως 30) και τυπικές τιμές π και α για τέτοιες τιμές προγραμμάτων ($n = 0.5$ και $a = 0.05$), οι «σταθμισμένοι ως προς τον κίνδυνο» λόγοι κόστους - οφέλους είναι ακόμη σχετικά μεγάλοι.

Με τα προαναφερθέντα προκύπτει πως πριν την εφαρμογή ενός προγράμματος, καλό θα ήταν να διεξαχθεί και μια εμπεριστατωμένη τεχνοοικονομική μελέτη, που να αποδεικνύει πως η σχέση οφέλους – κόστους θα είναι αποδοτικότερη από άλλες πρακτικές που εφαρμόζονται σε περιόδους ανομβρίας, όπως είναι για παράδειγμα η αφαλάτωση, ή και η μεταφορά νερού από γειτονικές χώρες.

Συνοψίζοντας πρέπει να γίνει αποδεκτό, πως η σπορά νεφών για την αύξηση της βροχόπτωσης είναι μια αναδυόμενη και πολλά υποσχόμενη τεχνολογία. Τα στοιχεία ότι ορισμένες καιρικές συνθήκες μπορούν, υπό τις κατάλληλες προϋποθέσεις, να τροποποιηθούν, με κάποια διαδικασία ή τρόπο σποράς, βασίζονται σε στατιστικές ενδείξεις, οι οποίες όμως δεν έχουν ακόμα την απαραίτητη φυσική υποστήριξη για να δικαιολογήσουν, αλλά και να επαληθεύσουν τα αποτελέσματα των προγραμμάτων που έγιναν μέχρι σήμερα. Ωστόσο, παρά τις όποιες αβεβαιότητες στην απόδειξη της αύξησης της βροχόπτωσης, η τεχνολογία αυτή εφαρμόζεται σε πολλές χώρες του κόσμου, και το γενικό συμπέρασμα που έχει εξαχθεί είναι ότι, η κατακρήμνιση μπορεί να αυξηθεί σε ένα ποσοστό της τάξης του 10% και πάνω.

Μια ανάλυση του World Meteorological Organization's Register of National Weather Modification Projects αποκαλύπτει, μια αυξανόμενη παγκόσμια δραστηριότητα στην τροποποίηση του καιρού για αύξηση των βροχοπτώσεων, λόγω των αυξανόμενων αναγκών για πρόσθετους υδάτινους πόρους, αλλά και λόγω των συνεχόμενων μελετών που συνδέονται με την ανοδική τάση της θερμοκρασίας του πλανήτη και την σύνδεση της με την εμφάνιση ξηρασίας.



Η περιοχή που βρίσκεται η Κύπρος περιλαμβάνεται σε αυτές τις περιοχές, που οι προβλέψεις για τους υδάτινους πόρους δεν είναι και οι πιο αισιόδοξες. Η τάση για ερημοποίηση, που είναι το ακραίο σενάριο, δείχνει να είναι και η επικρατέστερη, και επομένως θα πρέπει να εφαρμοστούν όλα τα διαθέσιμα εργαλεία για την αποφυγή της. Μπορεί, να μην παρουσιάστηκαν ακράδαντα στοιχεία, πως η αύξηση της βροχόπτωσης επιτυγχάνεται με βεβαιότητα μέσω της τροποποίησης των καιρικών συνθηκών, είναι όμως μια τεχνολογία, που αξίζει να δοκιμαστεί, και στην πορεία να αποδειχθεί, πως η εφαρμογή της στην Κύπρο είναι και επιτυχημένη, και να επωφεληθεί ολόκληρο το νησί.

ΣΥΝΟΨΗ – ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο στόχος αυτής της διατριβής ήταν να διερευνηθεί κατά πόσον η περιοχή της Κύπρου προσφέρεται για την εφαρμογή προγραμμάτων τροποποίησης καιρού με στόχο την αύξηση της βροχόπτωσης. Αρχικά αναφέρονται γενικά και κλιματολογικά στοιχεία για την περιοχή ενδιαφέροντος και στη συνέχεια γίνεται μια ιστορική αναφορά στις φυσικές έννοιες της σποράς νεφών για την αύξηση της βροχόπτωσης καθώς και σε προγράμματα στατικού και δυναμικού τρόπου σποράς νεφών, τα οποία διενεργήθηκαν σε διάφορες περιοχές του πλανήτη, ώστε να βρεθεί η επίδραση της τροποποίησης στα νέφη και στην βροχόπτωση που παράγουν.

Ακολούθως εξετάζονται οι συνθήκες ξηρασίας μέσω του δείκτη PDSI με δεδομένα από έξι σταθμούς σε παραθαλάσσιες, πεδινές και ορεινές περιοχές της Κύπρου και υπολογίζεται η τιμή του δείκτη PDSI για τον κάθε ένα από αυτούς. Η τάση του δείκτη στους πλείστους σταθμούς εμφανίζεται να τείνει προς ελαφρώς πιο ξηρές μελλοντικές καταστάσεις, κάτι που είναι σε συμφωνία με τις περισσότερες εκτιμήσεις για την περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου.

Στη συνέχεια γίνεται μια ανάλυση και ταξινόμηση για δέκα χρόνια (2000-2009) των συνοπτικών τύπων κυκλοφορίας που επηρέασαν την περιοχή και χαρακτηρίζονται από ασταθείς καιρικές συνθήκες. Επίσης γίνεται σύνδεση τους με την βροχόπτωση που καταγράφηκε σε 37 σταθμούς και την εμφάνιση νεφών έντονης κατακόρυφης ανάπτυξης και καταιγίδων όταν η περιοχή επηρεαζόταν από ένα από τους επτά τύπους κυκλοφορίας.

Τα δεδομένα της βροχόπτωσης χρησιμοποιήθηκαν και για τον υπολογισμό μιας συνάρτησης η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προγνωστικό εργαλείο. Μέσω της μεθόδου πολλαπλής παλινδρόμησης κατασκευάστηκε μια συνάρτηση εκτίμησης της βροχόπτωσης για τον κάθε τύπο ξεχωριστά.

Τα συμπεράσματα της μελέτης δείχνουν ένα πρόγραμμα τροποποίησης καιρού μπορεί να εφαρμοστεί, έστω και δοκιμαστικά, καθώς η περιοχή επηρεάζεται από συστήματα που έχουν τη δυνατότητα να δώσουν βροχές, περίπου στις μισές μέρες του έτους. Παρόλα αυτά, η εφαρμογή ενός προγράμματος θα πρέπει πρώτα να αναλυθεί τεχνοοικονομικά, ώστε να αποδειχθεί ότι τα πολλά οφέλη της βροχής μπορούν να ληφθούν με επιτρεπτό κόστος.



ABSTRACT

The purpose of this thesis was to investigate whether the area of Cyprus has the potentiality for the application of weather modification programs for rain enhancement. At first an introduction to the area of interest is being made including some climatological data and then follows a historical report for the physical hypotheses of cloud seeding as well as a listing of several experiments of static and dynamic seeding mode, that were conducted in various areas of the planet to find the effect of weather modification on clouds and their production of rainfall.

An investigation of drought conditions follows, with the application of the PDSI index for six stations over coastal, lowland and mountainous areas of Cyprus and a calculation for each one of them is being made. The index trend for the future for most of them, appears to be towards mild drought conditions, a result that is in accordance with most of the estimations for the area of the Eastern Mediterranean.

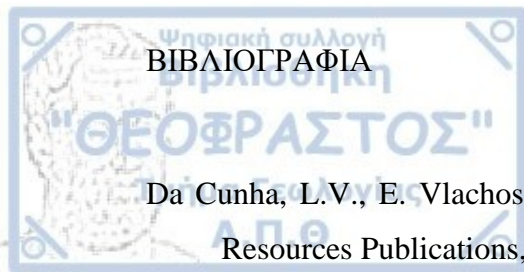
A ten-year period (2000-2009) is being examined for the synoptic circulation types that are characterized from unstable weather conditions and that affected the area. A classification of the types is constructed and also a correlation with the rainfall from 37 meteorological stations as well as the convective activity for each type is presented.

The rainfall data were used for the development of a formula that could be used as a forecasting tool. The multiple regression method is applied and formulas that estimate the expected rain is developed for each one of the synoptic types.

It is concluded that a rain enhancement program could experimentally be applied, since the area of interest is being affected with systems that have the potential of producing rain for almost half of the days in a year. Nevertheless, such an application should primarily be examined techno-economically so that the benefits of rain come at an affordable cost.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Boyden, C.J., 1963: A Simple Instability Index for Use Synoptic Parameter. *Meteor. Magazine*, 92, 198-210.
- Braham, R. R., Jr, 1986: Precipitation enhancement. A scientific challenge. *Precipitation Enhancement-A Scientific Challenge, Meteor. Monogr.*, No. 43, Amer. Meteor. Soc., 1-5.
- Braham, R. R., Jr., 1979: Field experimentation in weather modification. *J. Amer. Stat. Assoc.*, 74, 57-104.
- Branch, O.; Behrendt, A.; Gong, Z.; Schwitalla, T.; Wulfmeyer, V. Convection initiation over the Eastern Arabian Peninsula. *Meteorol. Z.* **2020**, 29, 67–77. [
- Bruintjes, R. T., D. W. Breed, M. J. Dixon, B. G. Brown, V. Salazar, and H. R. Rodriguez, 1998: Program for the augmentation of rainfall in Coahuila (PARC): Overview and preliminary results. Preprints, *Conf on Cloud Physics and 14th Conf on Planned and Inadvertent Weather Modification*, Everett, WA, Amer. Meteor. Soc., 600-603.
- Bruintjes, R. T., 1999: A review of cloud seeding experiments to enhance precipitation and some new prospects. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80, 805-820.
- Bruintjes, R.T.; Salazar, V.; Semeniuk, T.A.; Buseck, P.; Breed, D.W.; Gunkelman, J. Evaluation of hygroscopic cloud seeding flares. *J. Weather Modif.* 2012, 44, 69–94.
- Burnash, R. J., Ferral, L., 1973: Generalized hydrologic modeling. A key to Drought Analysis. *Water Res. Publ.*, Fort Collins, Colo., 503-514.
- Cooper, W. A., and R. P. Lawson, 1984: Physical interpretation of results from the HIPLEX-1 experiment. *J. Climate Appl. Meteor.*, 23, 523-540.
- Cooper, W.A.; Bruintjes, R.T.; Mather, G.K. Calculations pertaining to hygroscopic seeding with flares. *J. Appl. Meteorol.* 1997, 36, 1449–1469.
- Cotton, W. R. Modification of precipitation from warm clouds—A review. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1982, 63, 146–160.
- Cotton, W. R., 1986: Testing, implementation, and evolution of seeding concepts—A review. *Precipitation Enhancement—A Scientific Challenge, Meteor. Monogr.*, No. 43, Amer. Meteor. Soc., 139-149.



Da Cunha, L.V., E. Vlachos and V. Yevjevich, 1983: Copying with droughts, Water Resources Publications, Colorado, U.S.A., 3-11.

Dalezios, N. R., 1975: Droughts and their computation. Presented at the Symposium on Meteorology and Agriculture, University of Athens, Greece, 1-6 December.

Dennis, A. S, and H. D. Orville, 1997: Comments on "A new look at the Israeli cloud seeding experiments." *J. Appl. Meteor.*, 36, 277-278.

Flossmann et al., 2019 Review of Advances in Precipitation Enhancement Research.

Gabriel, K. R., 1981: On the roles of physicists and statisticians in weather modification experimentation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 62, 62-69.

Gabriel, K. R., and D. Petrondas, 1983: On using historical comparisons in evaluating cloud seeding operations. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22, 626-631.

Gabriel, K. R., and D. Rosenfeld, 1990: The second Israeli rainfall stimulation experiment: Analysis of precipitation on both targets. *J. Appl. Meteor.*, 29, 1055-1067.

Gabriel, K. R., 1999: Ratio statistics for randomized experiments in precipitation stimulation. *J. Appl. Meteor.*, 38, 290-301.

Gabriel, K. R., 2000: Planning and evaluation of weather modification projects. *Seventh WMO Sci. Conf on Weather Modification*, (Suppl.) Vol. III, Chiang Mai, Thailand, WMO, 39-59.

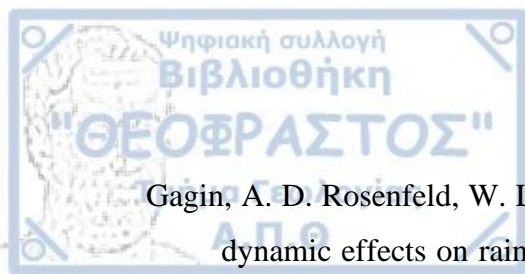
Gagin, A., and J. Neumann, 1974: Rain stimulation and cloud physics in Israel. *Weather and Climate Modification*, W. N. Hess, Ed., Wiley-Interscience, 454-194.

Gagin, A., 1981: The Israeli rain enhancement experiments. A physical overview. *J. Wea. Modif*, 13, 1-13.

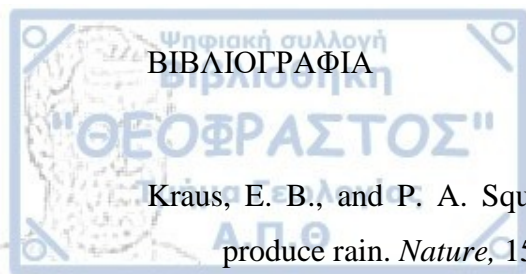
Gagin, A., and J. Neumann, 1981: The second Israeli randomized cloud seeding experiment: Evaluation of results. *J. Appl. Meteor.*, 20, 1301-1311.

Gagin, A., D. Rosenfeld, and R. E. Lopez, 1985: The relationship between height and precipitation characteristics of summertime convective cells in South Florida. *J. Atmos. Sci.*, 42, 84-94.

Gagin, A., 1986: Evaluation of "static" and "dynamic" seeding concepts through analyses of Israeli II experiment and FACE-2 experiments. *Precipitation Enhancement—A Scientific Challenge*, Meteor. Monogr., No. 43, Amer. Meteor. Soc., 63-76.

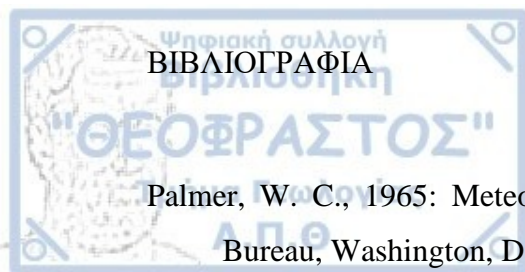


- Gagin, A. D. Rosenfeld, W. L. Woodley, and R. E. Lopez, 1986: Results of seeding for dynamic effects on rain cell properties in FACE-II. *J. Climate Appl. Meteor.*, 25, 3-13.
- Galway, J.G., 1956: The Lifted Index as a Predictor of Latent Instability. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 37, 528pp.
- George, J.J., 1960: *Weather Forecasting for Aeronautics*. Academic Press.
- Hadjinicolaou, Panos; Giannakopoulos, Christos; Zerefos, Christos; Lange, Manfred A.; Pashiardis, Stelios; Lelieveld, Jos (2011). "Mid-21st century climate and weather extremes in Cyprus as projected by six regional climate models". *Regional Environmental Change*. 11 (3): 441–457.
- Karacostas, T.S., 1990: The development of an index as an aid in forecasting mesoscale convective storms over North-Central Greece. 21st Int. Conf. For Alpine Meteorology, Engelberg, Switzerland, 227-230.
- Karacostas, T., Flocas A.A., Flocas H.A., Kakaliagou O. and Rizou C, 1992: A study of the synoptic situations over the area of Eastern Mediterranean. Proceedings, 1st Greek Conf. On Meteorology-Climatology-Physics of the Atmosphere, 21–23 May, Thessaloniki, Greece, pp 469–477 (in Greek).
- Karacostas, T. S., 2003: Synoptic, dynamic and cloud microphysical characteristics related to precipitation enhancement projects. 194-200. In: Regional Seminar on Cloud Physics and weather modification. World Meteorological Organization, WMP No. 42, WMO-TD No. 1227, 213pp.
- Karacostas, T., I. Pytharoulis, I. Tegoulas, D. Bampzelis, S. Kartsios, S. Kotsopoulos, P. Zanis, E. Katragkou, P. Mouskos and K. Tympanidis, 2015: The Development of the DAPHNE Conceptual Model for the Potentiality of Designing a Precipitation Enhancement Project in Thessaly, Greece. In Proc.: 95th AMS Annual Meeting, January 4-8, Phoenix, Arizona, U.S.A. https://ams.confex.com/ams/95Annual/webprogram/Manuscript/Paper261416/Karacostas_et_al_2015.pdf
- Knight, C. A., Ed., 1982: The Cooperative Convective Precipitation Experiment (CCOPE), 18 May-7 August 1981. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 63, 386-398.
- Koloskov, B., and Coauthors, 1996: Results of experiments of convective precipitation enhancement in the Camaguey experimental area, Cuba. *J. Appl. Meteor.*, 35, 1524-1534.



- Kraus, E.B., and P. A. Squires, 1947: Experiments on the stimulation of clouds to produce rain. *Nature*, 159, 489-492.
- Kucera, P.A., Axisa, D., Burger, R.P., Collins, D.R., Li, R., Chapman, M., Posada, R., Krauss, T.W., Ghulam, A.S., 2010. Features of the weather modification assessment project in the southwest region of Saudi Arabia. *J. Wea. Mod.* 42, 78–103.
- Lahav, R., and D. Rosenfeld, P. Sudhikoses, and W. Sukarnjanset, 1998: The evolution of water and hydrometeors with height and time in convective clouds over Israel, Texas and Thailand. Preprints, *Conf. on Cloud Physics and 14th Conf. on Planned and Inadvertent Weather Modification*, Everett, WA, Amer. Meteor. Soc., J5-J8.
- Lamb, D., R. I. Sax, and J. Hallett, 1981: Mechanistic limitations to the release of latent heat during the natural and artificial glaciation of deep convective clouds. *Quart. J. Roy. Meteor.Soc.*, 107, 935-954.
- Langmuir, I., 1951: *Progress in Cloud Modification by Project Cirrus*. G.E. Research Laboratory, Project Cirrus, Final Report, 259 pp.
- Leopold, L. B., and M. H. Halstead, 1948: First trials of the Schaefer-Langmuir dry-ice cloud seeding technique in Hawaii. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 29, 525-534.
- Levi, Y., and D. Rosenfeld, 1996: Ice nuclei, rainwater chemical composition, and static cloud seeding effects in Israel. *J. Appl. Meteor.*, 35, 1494-1501.
- Levin, Z., 1992: The role of large aerosols in the rainfall of the eastern Mediterranean. *Proc. WMO Workshop on Cloud Microstructure and Applications to Global Change*, Toronto, Ontario, Canada, WMO, 115-120.
- Levin, Z, E. Ganor, and V. Gladstein, 1996: The effects of desert dust particles coated with sulfate on rain formation in the eastern Mediterranean. *J. Appl. Meteor.*, 35, 1511-1523.
- Levin, Z, S. Krichak, and T. Reisen, 1997: Numerical simulation of dispersal of inert seeding material in Israel using a three-dimensional mesoscale model (RAMS). *J. Appl. Meteor.*, 36, 474-484.
- Levy, G., and W. R. Cotton, 1984: A numerical investigation of mechanisms linking glaciation of the ice-phase to the boundary layer. *J. Climate Appl. Meteor.*, 23, 1505-1519.

- List, R., K. R. Gabriel, B. A. Silverman, Z. Levin, and T. Karacostas, 1999: The rain enhancement experiment in Puglia, Italy: Statistical evaluation. *J. Appl. Meteor.*, 38, 281-289.
- Mather, G. K., D. E. Terblanche, F. E. Steffens, and L. Fletcher, 1997: Results of the South African cloud seeding experiments using hygroscopic flares. *J. Appl. Meteor.*, 36, 1433-1447.
- Mazroui, A.A.; Farrah, S. The UAE seeks leading position in global rain enhancement research. *J. Weather Modif.* 2017, 49, 1.
- Mielke, P. W., K. J. Berry, A. S. Dennis, P. L. Smith, J. R. Miller, and B. A. Silverman, 1984: HIPLEX-1: Statistical evaluation. *J. Climate Appl. Meteor.*, 23, 513-522.
- Miller, R.C., 1967: Notes on Analysis and Severe Storm Forecasting Procedures of the Military Weather Warning Center. AWS Tech. Rep. 200, USAF, 170 pp. (Available from Headquarters, AWS, Scott AFB, IL 62225) *Modification*, Atlanta, GA, Amer. Meteor. Soc., 60-67.
- Mouskos P., and T. Karacostas, 2018: A classification of upper-air synoptic circulation types associated with precipitation over the Eastern Mediterranean. 14th International Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics - COMECAP 2018, Alexandroupolis, Greece.
- Neumann, J., and E. Shimbursky, 1972: On the distribution of a ratio of interest in single-area cloud seeding experiments. *J. Appl. Meteor.*, 11, 370-375.
- Nicoll, K.; Airey, M.; Harrison, R.G.; Marlton, G. Rainfall in the desert: Anatomy of rainfall events in the United Arab Emirates. In Proceedings of the 23rd EGU General Assembly, Held Online, 19–30 April 2021.
- Nirel, R., and D. Rosenfeld, 1994: The third Israeli rain enhancement experiment—An intermediate analysis. *Proc. Sixth WMO Sci. Conf. on Weather Modification*, Paestum, Italy, WMO, 569-572.
- Orr, J. L., D. Fraser, and K. G. Pettit, 1950: Canadian experiments on artificially inducing precipitation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 31, 56-59.
- Orville, H. D., 1986: A review of dynamic-mode seeding of summer cumuli. *Precipitation Enhancement—A Scientific Challenge*, *Meteor. Monogr.*, No. 43, Amer. Meteor. Soc., 43-62.



Palmer, W. C., 1965: Meteorological Drought. Research Paper No 45, US Weather Bureau, Washington, D.C., Feb., 58pp.

Rangno, A. L., and P. V. Hobbs, 1995: A new look at the Israeli cloud seeding experiments. *J. Appl. Meteor.*, 34, 1169-1193.

Rangno, A. L., and P. V. Hobbs, 1997: Reply. *J. Appl. Meteor.*, 36, 272-276.

Reid, J.; Westphal, D.; Reid, E.; Walker, A.; Liu, M.; Miller, S.; Kuciauskas, A. The United Arab Emirates Unified Aerosol Experiment (UAE2); Naval Research Lab Monterey CA Marine, Meteorology Division: Monterey, CA, USA, 2006.

Reisen, T., S. Tzivion, and Z. Levin, 1996: Seeding convective clouds with ice nuclei or hygroscopic particles: A numerical study using a model with detailed microphysics. *J. Appl. Meteor.*, 35, 1416-1434.

Rosenfeld, D., 1987: Objective method for tracking and analysis of convective cells as seen by radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 4, 422-434.

Rosenfeld, D, and W. L. Woodley, 1989: Effects of cloud seeding in west Texas. *J. Appl. Meteor.*, 28, 1050-1080.

Rosenfeld, D, and H. Farbstein, 1992: Possible influence of desert dust on seedability of clouds in Israel. *J. Appl. Meteor.*, 31, 722-731.

Rosenfeld, D, and W. L. Woodley, 1993: Effects of cloud seeding in west Texas: Additional results and new insights. *J. Appl. Meteor.*, 32, 1848-1866.

Rosenfeld, D, and R. Nirel, 1996: The interaction of the desert dust and the southern margins of rain cloud systems in Israel. *J. Appl. Meteor.*, 35, 1502-1510.

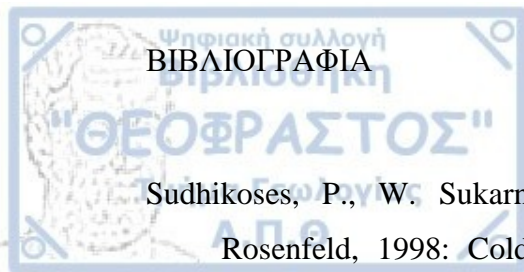
Rosenfeld, D, 1997: Comments on "A new look at the Israeli cloud seeding experiments." *J. Appl. Meteor.*, 36, 260-271.

Rosenfeld, D, and R. Nirel, 1997: Cloud microphysical observations of relevance to the cold-cloud seeding conceptual model. *J. Wea. Modif*, 29, 56-68.

Rosenfeld, D, and M. I. Lensky, 1998: Space-borne based insights into precipitation formation processes in continental and maritime convective clouds. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, 2457-2476.

Rosenfeld, D, and R. Nirel, P. Sudhikoses, N. Tantipubthong, and W. Sukarnjanaset, 1999: The Thailand cold cloud seeding experiment: 3. Physical support for the experimental results. *Proc. Seventh WMO Sci. Conf. on Weather Modification*, Chiang Mai, Thailand, WMO, 29-32.

- Rosenfeld, D., Axisa, D., Woodley, W.L., Lahav, R., 2010. A quest for effective hygroscopic cloud seeding. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 49 (7), 1548–1562.
- Ryan, B. F., and W. D. King, 1997: A critical review of the Australian experience in cloud seeding. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 239-254.
- Sax, R. I., J. Thomas, and M. Bonebrake, 1979: Ice evolution within seeded and non-seeded Florida cumuli. *J. Appl. Meteor.*, 18, 203-214.
- Schaefer, V. J., 1946: The production of ice crystals in a cloud of supercooled water droplets. *Science*, 104, 457-459.
- Silverman, B. A., 1986: Static mode seeding of summer cumuli— A review. *Precipitation Enhancement—A Scientific Challenge, Meteor. Mongr.*, No. 43, Amer. Meteor. Soc., 7-24.
- Silverman, B. A., 1990: Precipitation enhancement: A scientific challenge, *La modifica del tempo*, Universita delgi studi di Palermo
- Silverman, B. A, C. L. Hartzell, W. L. Woodley, and D. Rosenfeld, 1994: *Thailand Applied Atmospheric Research Program. Vol. 2, Demonstration Project Design*, Rep. R-94-01, Bureau of Reclamation, U.S. Dept. of the Interior, 183 pp.
- Silverman, B. A, 2000: An independent statistical reevaluation of the South African hygroscopic flare seeding experiment. *J. Appl. Meteor.*, 39, 1373-1378.
- Silverman, B. A, and W. Sukarnjanaset, 2000: Results of the Thailand warmcloud hygroscopic seeding experiment. *J. Appl. Meteor.*, 39, 1160-1175.
- Simpson, J., G. W. Brier, and R. H. Simpson, 1967: Stormfury cumulus seeding experiment 1965: Statistical analysis and main results. *J. Atmos. Sci.*, 24, 508-521.
- Simpson, J., and W. L. Woodley, 1971: Seeding cumulus in Florida: New 1970 results. *Science*, 172, 117-126.
- Simpson, J., 1980: Downdraft as linkages in dynamic cumulus seeding effects. *J. Appl. Meteor.*, 19, 477-487.
- Smith, E. J., 1949: Five experiments in seeding cumuliform cloud layers with dry ice. *Aust. J. Sci. Res. (A)*, 5, 78-91.
- Smith, P. L., and Coauthors, 1984: HIPLEX-1: Experimental design and response variables. *J. Climate Appl. Meteor.*, 23, 497-512.
- Squires, P. A., and E. J. Smith, 1949: The artificial stimulation of precipitation by means of dry ice. *Aust. J. Sci. Res. (A)*, 2, 232- 245.



- Sudhikoses, P., W. Sukarnjanaset, N. Tantipubthong, W. L. Woodley, and D. Rosenfeld, 1998: Cold-cloud microphysical observations in seeded and non-seeded Thai clouds. Preprints, *Conf. on Cloud Physics and 14th Conf. on Planned and Inadvertent Weather Modification*, Everett, WA, Amer. Meteor. Soc., J40-J43.
- Taha Al Hosari et al 2021: The UAE Cloud Seeding Program: A Statistical and Physical Evaluation.
- Tukey, J. W., D. R. Brillinger, and L. V. Jones, 1978: The role of statistics in weather resources management. *The Management of Weather Resources*, Vol. II, U.S. Government Printing Office, 97 pp.
- Vonnegut, B., 1947: The nucleation of ice formation by silver iodide. *J. Appl. Phys.*, 18, 593-595.
- Vonnegut, B., and K. Maynard, 1952: Spray-nozzle type silver iodide smoke generator for airplane use. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 33, 420-428.
- Weather Modification Advisory Board, 1978: *The Management of Weather Resources*. Vol. I. Dept. of Commerce, 229 pp.
- WMO, 1980: Statistical design considerations for precipitation enhancement projects. Precipitation Enhancement Project Rep. 17, WMO, 17 pp.
- WMO, 1986: Synopsis of the WMO Precipitation Enhancement Project—1985. Precipitation Enhancement Project Rep. 34, WMO, 97 pp.
- WMO, 2000: Report of the WMO International Workshop on Hygroscopic Seeding: Experimental Results, Physical Processes, and Research Needs. WMP Rep. 35, WMO/TD 1006, WMO, 68 pp.
- WMO, 2016, Handbook of Drought Indicators and Indices, Integrated Drought Management Programme
- Woodley, W. L., 1970: Precipitation results from a pyrotechnic cumulus seeding experiment. *J. Appl. Meteor.*, 9, 242-257.
- Woodley, W. L, J. Jordan, J. Simpson, R. Biondini, J. A. Flueck, and A. Barnston, 1982b: Rainfall results of the Florida Area Cumulus Experiments, 1970-1976. *J. Appl. Meteor.*, 21, 139-164.

- Woodley, W. L, J. A. Flueck, R. Biondini, R. I. Sax, J. Simpson, and A. Gagin, 1982a: Clarification of the confirmation in the FACE- 2 experiment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 63, 273-276.
- Woodley, W. L, A. Barnston, J. A. Flueck, and R. Biondini, 1983: The Florida Area Cumulus Experiment's Second Phase (FACE-2). Part II: Replicated and confirmatory analyses. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22, 1529-1540.
- Woodley, W. L, and D. Rosenfeld, 1996: Testing cold-cloud seeding concepts in Texas and Thailand. Part I: Results in Texas to date. Preprints, *13th Conf on Planned and Inadvertent Weather*
- Woodley, W. L, 1997: Comments on "A new look at the Israeli cloud seeding experiments." *J. Appl. Meteor.*, 36, 250-252.
- Woodley, W. L, D. Rosenfeld, W. Sukarnjanaset, P. Sudhikoses, S. Ruangsuttinaruparp, and W. Khantiyanan, 1999a: The Thailand cold-cloud seeding experiment: 1. Physical-statistical design. *Proc. Seventh WMO Sci. Conf. on Weather Modification*, Chiang Mai, Thailand, WMO, 21-24.
- Woodley, W. L, D. Rosenfeld, W. Sukarnjanaset, P. Sudhikoses, S. Ruangsuttinaruparp, and W. Khantiyanan, 1999b: The Thailand cold-cloud seeding experiment: 2. Results of the statistical evaluation. *Proc. Seventh WMO Sci. Conf on Weather Modification*, Chiang Mai, Thailand, WMO, 25-28.
- Woodley, W. L, B. A. Silverman, and D. Rosenfeld, 1999c: *Final Contract Report to the Ministry of Agriculture and Cooperatives*. Woodley Weather Consultants, 110 pp.
- Woodley, W. L, and D. Rosenfeld, 2000: Evidence for changes in microphysical structure and cloud drafts following Agl seeding. *J. Wea. Modif*, 32, 53-67.
- Wurtele, Z. S., 1971: Analysis of the Israeli cloud seeding experiments by means of concomitant meteorological variables. *J. Appl. Meteor.*, 10, 1185-1192.
- Yousef, L.A.; Temimi, M.; Wehbe, Y.; Al Mandous, A. Total cloud cover climatology over the United Arab Emirates. *Atmos. Sci. Lett.* **2019**, 20, e883.
- Zachariadis, T., 2012: Climate Change in Cyprus: Impacts and Adaptation Policies (PDF). *Cyprus Economic Policy Review*. **6** (1): 21–37.



Καρακώστας, Θ.Σ. : Ένα Καινοτόμο και Ολοκληρωμένο Εννοιολογικό Μοντέλο για την Αντιμετώπιση των Επιπτώσεων της Κλιματικής Μεταβολής στην Ξηρασία: Δυνητικότητα Εφαρμογής ενός Προγράμματος Αύξησης των Βροχοπτώσεων στη Θεσσαλία. Πλαίσιο Προγράμματος «ΔΑΦΝΗ» 2015.

Καρακώστας, Θ.Σ. και Μ.Β. Σιούτας, 1992: Σχέση υετίσμου ύδατος και ύψους βροχόπτωσης θερινών καταιγίδων στην περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας. *Πρακτικά 1^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας και Φυσικής της Ατμόσφαιρας*, Θεσσαλονίκη, 503-507.

Καρακώστας, Θ.Σ., 1999: *Σημειώσεις φυσικής των νεφών και τροποποίησης καιρού*. Α.Π.Θ., Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Θεσσαλονίκη, σελ. 70.

Μακρογιάννης, Τ.Ι. και Σαχσαμάνογλου, Χ.Σ., 2004: *Μαθήματα Γενικής Μετεωρολογίας*. Εκδόσεις Art of Text, Θεσσαλονίκη, 414 σελ.

Μαχαίρας, Π. , 2002: Σημειώσεις μαθήματος Υδρομετεωρολογίας, Π.Μ.Σ.

Μπαμπζέλης Δ., 2013 Διερεύνηση Συνθηκών Εφαρμογής Προγραμμάτων Αύξησης Βροχής: Εφαρμογή στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας, Διδακτορική Διατριβή.

Σαχσαμάνογλου, Χ.Σ. και Μακρογιάννης, Τ.Ι., 1998 *Γενική Μετεωρολογία*. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.

Φλόκας, Α.Α., 1994: *Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 465 σελ.

Το Κλίμα της Κύπρου, 2^η έκδοση, Λευκωσία, 1986, Τμήμα Μετεωρολογίας, Υπουργείο Γεωργίας, αγροτικής Ανάπτυξης και Περιβάλλοντος.

Διαδικτυακές Πηγές

https://en.wikipedia.org/wiki/Climate_of_Cyprus

www.bloomberg.com



www.esa.int

www.northamericanweatherconsultants.com

www.physicsworld.com

www.raob.com

www.rathbones.com

www.researchgate.net

www.thenationalnews.com/uae

www.thethirdpole.net

www.uaerep.ae

www.unidata.ucar.edu

www.mapsof.net/cyprus/cyprus-topo