



**ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΠΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ
ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΥΔΡΟΜΕΤΕΩΡΩΝ**

ΔΡΑΚΑΚΗ ΕΛΕΝΗ

Τριμελής Επιτροπή:

Γ.Κάλλος, Καθηγητής ΕΚΠΑ (κύριος επιβλέπων)

Ε.Φλόκα, Αναπλ. Καθηγήτρια ΕΚΠΑ

Γ.Παπαϊωάννου, Επικ.Καθηγήτρια ΕΚΠΑ

ΑΘΗΝΑ 2014

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Εισαγωγή.....	5
Κεφάλαιο 1^ο : Θεωρητικό μέρος.....	8
1.1. Ταξινόμηση νεφών.....	8
1.1.1. Στρατοσφαιρικά.....	8
1.1.2. Τροποσφαιρικά.....	9
1.2. Μικροφυσική νεφών και μηχανισμοί δημιουργίας του υετού.....	15
1.2.1. Αιωρούμενα σωματίδια.....	15
1.2.2. Δημιουργία υετού.....	18
1.2.2.1. Δημιουργία υετού σε θερμά νέφη.....	19
1.2.2.2. Δημιουργία υετού σε ψυχρά νέφη.....	24
1.2.2.3. Δημιουργία υετού σε ορογραφικά νέφη.....	26
1.2.2.4. Καταιγίδα.....	27
1.3. Τροποποίηση καιρού.....	31
1.3.1. Hygroscopic seeding.....	32
1.3.2. Glaciogenic seeding	33
1.3.3. Ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας.....	34
Κεφάλαιο 2^ο : Περιγραφή των γενικών χαρακτηριστικών του αριθμητικού μοντέλου RAMS.....	35
2.1. RAMS.....	35
2.2. ICLAMS.....	44
Κεφάλαιο 3^ο : Πειραματικό μέρος.....	48
3.1. Επιλογή νεφικών σχηματισμών ως δεδομένα εισόδου στο μοντέλο.....	48
3.2. Έλεγχος ευαισθησίας για την επίδραση αιωρούμενων σωματιδίων στον συνολικό υετού	59
3.3. Προσομοιώσεις τροποποίησης καιρού.....	66
3.4. Στατιστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.....	83
Κεφάλαιο 4^ο : Συμπεράσματα.....	89
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	

Στην Ευτυχία

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Γεώργιο Κάλλο κύριο επιβλέποντα της παρούσας εργασίας για την ευκαρία που έδωσε να δουλέψω κοντά του και για την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της, καθώς και τον κύριο Σταύρο Σολωμο και την κυρία Ιόνη Κούστα για την βοήθειά τους τόσο στην τροποποίηση και τη χρήση του μοντέλου αλλά και για την ανθρώπινη στήριξη του όλο αυτόν τον καιρό. Εν γένει, ευχαριστώ όλη την Ομάδα Ατμοσφαιρικών Μοντέλων του Πανεπιστημίου Αθηνών. Τέλος ευχαριστώ τα μέλη της Τριμελούς Επιτροπής για την καθοδήγησή τους και εν γένει όλους τους καθηγητές του Μεταπτυχιακού για τις γνώσεις που προσπάθησαν να μου διδάξουν.

Εισαγωγή

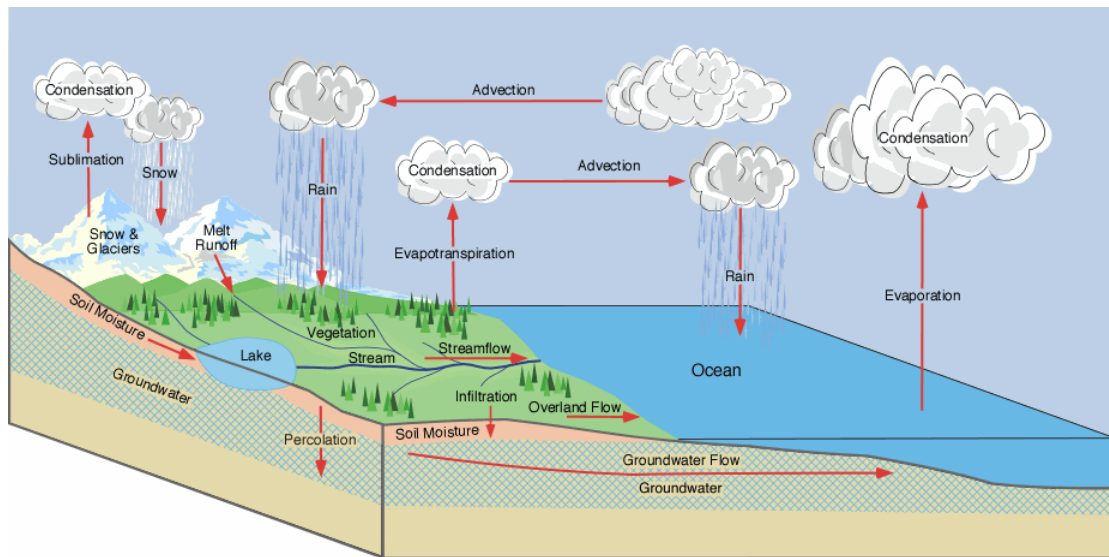
Το νερό είναι η γνωστότερη χημική ένωση καθώς αποτελεί ζωτικό αγαθό για τον άνθρωπο, μιας και κάθε ανθρώπινο κύτταρο αποτελείται κατά 70% από αυτό. Συνεπώς, σημαντικές αλλαγές στην ποσότητα αλλά και στη χωροχρονική κατανομή του νερού έχει σημαντικές επιπτώσεις στη βιόσφαιρα (Levin and Cotton 2009). Από την μία μεριά φαινόμενα όπως τυφώνες και πλημμύρες και από την άλλη μεριά φαινόμενα όπως εκτενής ξηρασίες μπορούν να είναι ιδιαίτερα καταστροφικά. Η γη αποτελείται από 71% νερό το οποίο μέσω των φυσικών διεργασιών του υδρολογικού κύκλου ανανεώνεται, φιλτράρεται και ανακατανέμεται συνεχώς.

Ο υδρολογικός κύκλος, όπως αποτυπώνεται και στο *Σχήμα 1* περιλαμβάνει πολύπλοκες διαδικασίες που πραγματοποιούνται στο έδαφος και στην ατμόσφαιρα. Η αλληλεπίδραση της ατμόσφαιρας με τις υδάτινες επιφάνειες μέσω της εξάτμισης του νερού και με τις φυτικές μέσω της εξαμισοδιαπνοής των φυτών τροφοδοτεί την ατμόσφαιρα με νερό. Η συμπύκνωση του νερού αυτού μέσω των ατμοσφαιρικών θερμοδυναμικών μεταβολών οδηγεί στη δημιουργία νεφών. Τα νέφη στη συνέχεια ανάλογα με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες αποδίδουν μέρος του νερού που περιέχουν με τη μορφή υετού πίσω στο έδαφος. Από εκεί μέσω της απορροής το νερό διοχετεύεται στην επίγειες και υπόγειες υδάτινες λεκάνες.

Ως εκ τούτου, ο σημαντικότερος τρόπος μεταφοράς του νερού στις φυσικές και τεχνητές δεξαμενές νερού είναι οι κατακρημνίσεις. Ιδιαίτερα κάποιες περιοχές του πλανήτη που δεν είναι προικισμένες με γλυκά υπόγεια ή επίγεια ύδατα, έχουν ως μόνη πηγή νερού τον υετό. Συνεπώς, η πληρέστερη κατανόηση των φυσικών μηχανισμών μικρής και μεγάλης κλίμακας που λαμβάνουν χώρα στο σχηματισμό νεφών και στην παραγωγή υετού από αυτά, καθώς επίσης και ο προσδιορισμός παραμέτρων που τους επηρεάζουν και τους τροποποιούν αποτελεί τα τελευταία χρόνια θέμα αιχμής στις έρευνες των ατμοσφαιρικών επιστημών.

Μάλιστα, τα τελευταία χρόνια μεγάλο ενδιαφέρον περιστρέφεται γύρω από τις μεθόδους τροποποίησης καιρού (weather modification) τόσο για την καταστολή ακραίων καιρικών φαινομένων όσο και για την διαχείριση των υδάτων. Στις

δυτικές Ηνωμένες Πολιτείες η τροποποίηση καιρού με τη μέθοδο της σποράς νεφών έχει εφαρμοσθεί επιτυχημένα ,καταφέροντας να αυξήσει το συνολικό υετό σε μία λεκάνη απορροής. Σε άλλες περιοχές ,όπως στο High Plains των Ηνωμένων Πολιτειών και στον Καναδά, χρησιμοποιείται με σκοπό την καταστολή χαλαζιού ώστε να περιοριστούν οι καταστροφές στις καλλιέργειες και στις αστικές περιοχές. Συγκεκριμένα, έχει αποδειχθεί ότι η σπορά ορογραφικών νεφών σε υπέρτηξη, μπορεί να αυξήσει την βροχόπτωση καθώς και τη χιονόπτωση. Ωστόσο, τα ποσοστά της αύξησης βρίσκονται ακόμα υπό συζήτηση (William R.Cotton,2007).



Σχήμα 1: Ο υδρολογικός κύκλος (<http://www.physicalgeography.net>)

Ο σχηματισμός, η ανάπτυξη και η διάλυση ενός νέφους σχετίζεται άμεσα με τις ατμοσφαιρικές κινήσεις μέσης και μεγάλης κλίμακας ως προς την έκταση και το χρόνο, ιδιαίτερη δε σημασία έχουν οι μηχανισμοί κατακόρυφων ατμοσφαιρικών κινήσεων. Όμως μέσα στο νέφος λαμβάνουν χώρα πολύπλοκες φυσικές διεργασίες πολύ μικρότερων διαστάσεων, της τάξης μεγέθους μιας υδροσταγόνας, μικροφυσικές διεργασίες. Αυτές είναι υπεύθυνες για τον σχηματισμό και την ανάπτυξη μίας μεμονωμένης υδροσταγόνας ή ενός παγοκρυστάλλου. Συνεπώς, στην προσπάθεια μελέτης αυτών των μηχανισμών που καθορίζουν τον σχηματισμό και την ανάπτυξη των νεφικών συστημάτων, συναντώνται δυσκολίες οι οποίες οφείλονται κυρίως στην μεταβλητότητα και την μη γραμμικότητα που αυτοί παρουσιάζουν.

Η χημική σύσταση της ατμόσφαιρας παίζει δραστικό ρόλο στον σχηματισμό νεφών και στην παραγωγή υετού από αυτά, εφόσον συσχετίζεται άμεσα με την μικροφυσική των νεφών και τις διαδικασίες αλλαγής φάσεων του περιεχόμενου νερού. Η ποσότητα του υετού εξαρτάται από την συγκέντρωση και τις ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Φυσικές ιδιότητες, όπως η μοριακή δομή και η αλληλεπίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων με την ακτινοβολία, και χημικές ιδιότητες, όπως η δραστηριότητά τους με άλλα συστατικά της ατμόσφαιρας, καθορίζουν το ρόλο τους στις μικροφυσικές διεργασίες μέσα στα νέφη. Από τους πιο σημαντικούς ρόλους που μπορούν να διαδραματίσουν τα αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα είναι ο ρόλος τους ως πυρήνες συμπύκνωσης ή παγοποίησης κάτω από ορισμένες συνθήκες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Θεωρητικό μέρος

1.1. Ταξινόμηση των νεφών

Τα νέφη είναι ένα σύνολο από πολύ μικρές υδροσταγόνες ή παγοκρυστάλλους ή και τα δύο που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα σε ύψη αρκετών εκατοντάδων μέτρων. Η δημιουργία τους προϋποθέτει την ύπαρξη νερού στην ατμόσφαιρα, μιας και αποτελούν τα προϊόντα συμπύκνωσης των υδρατμών. Ο αριθμός και το μέγεθος των υδροσταγόνων μεταβάλλονται από στιγμή σε στιγμή. Ωστόσο ένα αντιπροσωπευτικό μέγεθος του αριθμού των υδροσταγόνων μέσα σ' ένα νέφος είναι 100 σταγόνες ανά κυβικό εκατοστό με ακτίνα μεταξύ 10 μm και 20 μm . Τα νέφη ως επί το πλείστον σχηματίζονται στο κατώτερο τμήμα της ατμόσφαιρας, την τροπόσφαιρα, εφόσον είναι εκείνο που βρίσκεται σε άμεση αλληλεπίδραση με το έδαφος και τις πηγές εμπλουτισμού της ατμόσφαιρας με νερό. Έτσι το μέγιστο ύψος των νεφών είναι αυτό της τροπόπαυσης. Ωστόσο στις πολικές περιοχές του πλανήτη ,σχηματίζονται νέφη και σε μεγαλύτερα ύψη από αυτά της τροπόπαυσης, δηλαδή μέσα στην στρατόσφαιρα. Η στρατόσφαιρα είναι το αμέσως επόμενο τμήμα της ατμόσφαιρας το οποίο είναι ιδιαίτερα ξηρό καθώς η έντονη θερμοκρασιακή αναστροφή της τροπόπαυσης δεν επιτρέπει την κατακόρυφη μεταφορά υδρατμών. Ωστόσο, κάτω από ειδικές συνθήκες η αναστροφή αυτή δύναται να σπάσει σε ορισμένα σημεία και να μεταφέρει υδρατμούς μέσα στην στρατόσφαιρα. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει στις πολικές περιοχές με αποτέλεσμα τον σχηματισμό των πολικών στρατοσφαιρικών νεφών.

1.1.1. Στρατοσφαιρικά νέφη

Τα στρατοσφαιρικά νέφη παρατηρούνται στις πολικές περιοχές του πλανήτη, παίζουν σημαντικό ρόλο στη αλληλεπίδραση της ανώτερης ατμόσφαιρας με την ακτινοβολία, και οι λόγοι σχηματισμού τους δεν έχουν ακόμη αποσαφηνιστεί πλήρως. Ανάλογα με τη σύστασή τους και τις θερμοκρασίες τους ταξινομούνται σε δύο τύπους. (<http://www.meteoros.de/psc/psce.htm>).

Type II

Τα νέφη αυτά είναι κυματικά νέφη και είναι πιο γνωστά ως *μαργαρώδη νέφη* (*Nacreous clouds*). Συναντιούνται, συχνά, στα υπήνεμα βουνών μεγάλου όγκου όπου δημιουργούνται βαρυτικά κύματα τα οποία εισέρχονται μέσα στην στρατόσφαιρα και μεταφέρουν υγρασία. Η παρουσία των νεφών αυτών μπορεί να σχετίζεται και με την επικράτηση υψηλών επιφανειακών ανέμων οι οποίοι μπορούν να προκαλέσουν την παρουσία ανέμων και κυμάτων στην στρατόσφαιρα. Σχηματίζονται σε θερμοκρασία γύρω στους $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$, θερμοκρασίες που είναι χαμηλότερες από τη μέση θερμοκρασία της κατώτερης στρατόσφαιρας και αποτελούνται από παγοκρυστάλλους διαμέτρου $\sim 10\mu\text{m}$. Τα νέφη αυτά αντανακλούν το φως και αποδίδουν μία χαρακτηριστική λάμψη κάνοντάς τα ιδιαίτερα ελκυστικά στο ανθρώπινο μάτι, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1.

Type I

Τα νέφη αυτού του τύπου είναι λιγότερο θεαματικά από τα νέφη της προηγούμενης κατηγορίας, υφίστανται περισσότερη διάχυση και δεν έχουν τόσο λαμπερά χρώματα. Πολλές φορές τα νέφη των δύο κατηγοριών είναι ενσωματωμένα μεταξύ τους. Τέλος τα νέφη αυτής της κατηγορίας είναι λίγο θερμότερα με θερμοκρασίες $\sim 78\text{ }^{\circ}\text{C}$ και αποτελούνται από κρυστάλλους νερού, νιτρικών και θειικών οξειδίων.

1.1.2. Τροποσφαιρικά νέφη

Οι μορφές, η έκταση, το πάχος και οι χρωματισμοί που παρουσιάζουν τα νέφη είναι πολυάριθμοι και ιδιαίτερα ελκυστικοί στο ανθρώπινο μάτι. Η πρώτη προσπάθεια για την ταξινόμηση των νεφών έγινε από τον Γάλλο Λαμάρκ (J.Lamarck, 1744-1829). Η πιο επιτυχημένη όμως, έγινε από τον Άγγλο Χάουαρντ το 1803, και αποτέλεσε τη βάση για τη σύνταξη του Διεθνούς Άτλαντα Νεφών από τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό το 1956, ο οποίος ισχύει μέχρι και σήμερα.

Η ταξινόμηση των νεφών έχει γίνει με βάση τρία βασικά κριτήρια: την μορφή τους, το ύψος τους και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες κάτω από τις

οποίες δημιουργούνται. Οι βασικές μορφές είναι τρεις. Οι θύσανοι (cirrus), οι σωρείτες (cumulus) και τα στρώματα(stratus).

- Οι θύσανοι είναι λεπτά ινώδη νέφη που συναντώνται ψηλά στην τροπόσφαιρα, με λευκό χρώμα που συχνά παρουσιάζονται σαν πτερά. Αποτελούνται αποκλειστικά από παγοκρυστάλλους.

- Οι σωρείτες εμφανίζονται σαν αυτοτελείς πυκνές μάζες με επίπεδη βάση και κατακόρυφη ανάπτυξη υπό μορφή σωρού, συνήθως δε είναι χρώματος λευκού. Ανάλογα από το ύψος που μπορεί να φτάνει η κατακόρυφή τους ανάπτυξη μπορεί να αποτελούνται είτε αποκλειστικά από υδροσταγόνες είτε ταυτόχρονα από υδροσταγόνες και παγοκρυστάλλους.

- Τα στρώματα εμφανίζονται υπό τη μορφή χαμηλού εκτεταμένου στρώματος, χρώματος λευκόγκριζου που συνήθως καλύπτει μεγάλο μέρος του ουράνιου θόλου ή και ολόκληρο τον ουράνιο θόλο. Συνήθως αποτελούνται από υδροσταγόνες.

Όλες οι άλλες ονομασίες των νεφών προκύπτουν από συνδυασμό των παραπάνω αλλά και από προθέματα όπως ή, που χρησιμοποιούνται όταν το νέφος είναι βροχοφόρο, ενώ το πρόθεμα alto υποδηλώνει το ύψος του νέφους. Στον Πίνακα 1 καταγράφονται συνοπτικά, οι συχνότερες κατηγορίες νεφών και το ύψος τους στην ατμόσφαιρα σύμφωνα με την Διεθνή ταξινόμηση νεφών.

Πίνακας 1
Διεθνής ταξινόμηση νεφών με τα αντίστοιχα τυπικά ύψη δημιουργίας.

Κατηγορία	Ονομασία	Συντ/φία	Τυπικά ύψη(km) κατά περιοχές		
Ανώτερα	Θύσανοι (Cirrus)	Ci			
	Θυσανοστρώματα (Cirrostratus)	Cs	3-4	5-13	6-18
	Θυσανοσωρείτες (Cirrocumulus)	Cc			
Μέσα	Υψιστρώματα(Altostratus)	As	2-4	2-7	2-8
	Υψισωρείτες(Alto cumulus)	Ac			
Κατώτερα	Στρώματα(Stratus)	St			
	Στρωματοσωρείτες(Stratocumulus)	Sc	≤ 2	≤ 2	≤ 2
	Στρωματομελανίες(Nimbostratus)	Ns			

Μία περαιτέρω ταξινόμηση των νεφών μπορεί να γίνει με βάση τα εξής κριτήρια: α) τα χαρακτηριστικά των ανοδικών ρευμάτων, β) την έκταση που καταλαμβάνουν και γ) το χρόνο που διαρκούν και την έντασή τους, σε

συνδιασμό με το βαθμό της στατικής ευστάθειας ή αστάθειας στην ατμόσφαιρα. Έτσι, μπορούν να χωριστούν δύο βασικές κατηγορίες: τα σωρειτόμορφα νέφη (Cu, Cb) και τα στρωματομόρφα (St, Ns).

α) *Σωρειτόμορφα νέφη.* Όταν οποιοδήποτε αίτιο (θερμικό ή μηχανικό) εξαναγκάσει τον ατμοσφαιρικό αέρα σε ανοδική κίνηση μέσα σε ένα περιβάλλον θερμοδυναμικά ασταθές, σχηματίζονται νέφη μορφής σωρειτών (Cu). Η κατακόρυφη ανάπτυξη αυτών εξαρτάται από το πάχος του ατμοσφαιρικού στρώματος στο οποίο επικρατεί αστάθεια. Οι σωρείτες μικρής κατακόρυφης ανάπτυξης προϋποθέτουν ένα ασταθές στρώμα μικρού πάχους, αποτελούνται αποκλειστικά από υδροσταγόνες και δεν δύνανται να προκαλέσουν βροχή. Η ταχύτητα των ανοδικών ρευμάτων είναι σχετικά μικρή, της τάξεως των λίγων μέτρων ανά δευτερόλεπτο, και η περιεκτικότητά τους σε νερό φθάνει το $1\text{gr}/\text{m}^3$. Όταν, όμως, η ατμοσφαιρική αστάθεια εκτείνεται σε μεγάλο ύψος, τότε τα νέφη μπορεί να εκτείνονται κατακόρυφα μέχρι την Τροπόπαυση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2. Τα νέφη αυτά, που ονομάζονται σωρειτομελανίες, χαρακτηρίζονται από ισχυρά ανοδικά ρεύματα και μεγάλη περιεκτικότητα σε νερό και είναι αυτά που προκαλούν τις καταιγίδες. Το ανώτερο τμήμα των σωρειτομελανιών αποτελείται από παγοκρυστάλλους, με αποτέλεσμα την εμφάνιση θυσάνων (Ci) κοντά στις κορυφές τους. Χαρακτηριστική περίπτωση δημιουργία τέτοιου τύπου νεφών είναι το πέρασμα ενός ψυχρού μετώπου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.3.

Γενικά τα νέφη αυτά έχουν οριζόντια ανάπτυξη από 100 m έως 10 km , χρόνο ζωής μερικές ώρες και χαρακτηρίζονται από κατακόρυφες ταχύτητες λίγων μέτρων ανά δευτερόλεπτο. Η αναλογία μείγματος τους σε νερό είναι μεγάλη και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να ξεπερνά και τα 10 g kg^{-1} . Ο χρόνος ζωής των νεφών αυτών μπορεί να ποικίλει από μερικά λεπτά μέχρι αρκετές ώρες. Ο διαθέσιμος χρόνος για την δημιουργία κατακρημνισμάτων εξαρτάται από την κατακόρυφη ανάπτυξη των νεφών και από την ένταση των ανοδικών τους ρευμάτων. Έτσι, για παράδειγμα σε ένα σχετικά ρηχό σύννεφο πάχους 2 km , με ανοδικά ρεύματα της τάξεως 3ms^{-1} είναι:

$$t_p = \frac{2000\text{ m}}{3\text{ms}^{-1}} = 667\text{ s} \text{ δηλ περίπου } 11\text{ min.} \text{ Ενώ, για ένα σχετικά βαθύ νέφος}$$

πάχους περίπου 10 km και ανοδικών ρευμάτων περίπου 10 ms^{-1} είναι 17min (William R.Cotton,2007).

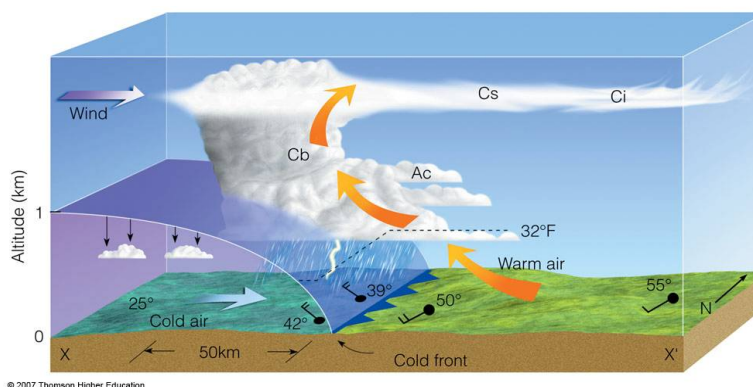
β) *Στρωματόμορφα νέφη*. Ασθενείς ανοδικές κινήσεις του ατμοσφαιρικού αέρα, για παράδειγμα από ανατάραξη τριβής μέσα σε ένα θερμοδυναμικά ευσταθές περιβάλλον, οδηγεί στην δημιουργία νεφών υπό μορφή στρωμάτων(St). Η παραπάνω διαδικασία δεν αποτελεί το μοναδικό μηχανισμό στρωματόμορφων νεφών. Ψύξη ή οριζόντια ανάμειξη αερίων μαζών με διαφορετικές θερμοκρασίες σε κάποιο ύψος μέσα στην ατμόσφαιρα μπορεί επίσης να δημιουργήσει στρωματόμορφα νέφη. Ωστόσο, στα μέσα γεωγραφικά πλάτη, ο σημαντικότερος μηχανισμός δημιουργία νεφών τέτοιου τύπου είναι οι ασθενείς ανοδικές κινήσεις που συνοδεύουν τα βαρομετρικά συστήματα, τα οποία καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις και διαρκούν αρκετές μέρες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα δημιουργίας μιας αλληλουχίας στρωματόμορφων νεφών σε διάφορα ύψη, είναι το πέρασμα ενός θερμού μετώπου, στο οποίο ο θερμός αέρα που ακολουθεί είναι θερμοδυναμικά ευσταθής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Τα νέφη αυτά προκαλούν βροχές μέτριας έντασης. Τα ανοδικά ρεύματα στα στρωματόμορφα νέφη είναι της τάξης των 10m/s, η δε περιεκτικότητά τους σε νερό είναι μερικά δέκατα του γραμμαρίου ανά κυβικό μέτρο. Ο χρόνος ζωής των νεφών αυτών είναι αρκετές δεκάδες ώρες. Η λαγκρανζιανή χρονική κλίμακα των υδρομετεώρων είναι της τάξης των 3 ωρών περίπου. Έτσι ,τα νέφη αυτά παρά το μικρό περιεχόμενό τους σε νερό, μπορούν να δώσουν σημαντικά ποσά βροχής.



Σχήμα 1.1: Μαργαρώδη νέφη πάνω από την Ανταρκτική. Η μορφή τους που μοιάζει με φύλλα υποδηλώνει τους ανέμους και τα κύματα στην ατμόσφαιρα. (<http://www.meteoros.de/psc/psce.htm>)

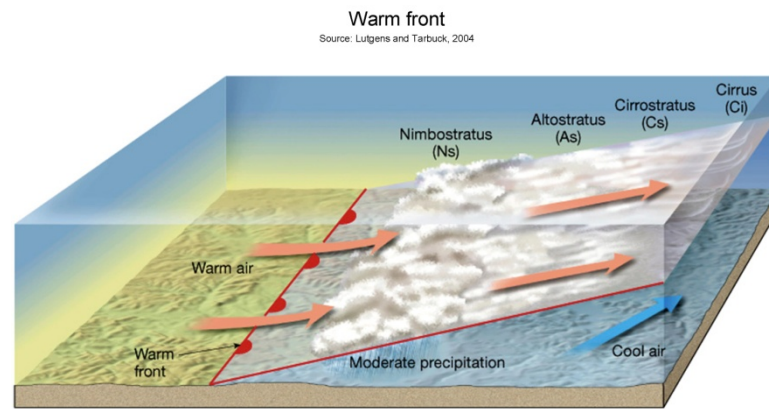


Σχήμα 1.2: Ανάπτυξη σωρειτόμορφου νέφους μέχρι το ύψος της τροπόπαυσης.



Σχήμα 1.3: Σχηματική αναπαράσταση του περάσματος ενός ψυχρού μετώπου, με αποτέλεσμα την δημιουργία καταιγιδοφόρου νέφους που αναπτύσσεται έως το ύψος της τροπόπαυσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – Θεωρητικό μέρος



Σχήμα 1.4: Σχηματική αναπαράσταση του περάσματος ενός θερμού μετώπου, στο οποίο ο θερμός αέρας που ακολουθεί είναι ευσταθής με αποτέλεσμα την δημιουργία στρωματόμορφων νεφών

1.2. Μικροφυσική των νεφών και μηχανισμοί δημιουργίας του υετού.

Σκοπός της μικροφυσικής των νεφών είναι να εξηγήσει τις μικροφυσικές διεργασίες που πραγματοποιούνται ώστε μία εμβρυακή σταγόνα, μεγέθους αντίστοιχου ενός πυρήνα συμπύκνωσης, αφού σχηματισθεί να μπορεί να εξελιχθεί σε μέγεθος σταγόνας βροχής.

Οι υδροσταγόνες ή οι παγοκρύσταλλοι μέσα σε ένα νέφος σχηματίζονται όταν ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι υπέρκορος σε σχέση με το ύδωρ ή με τον πάγο αντίστοιχα. Συγκεκριμένα οι υδροσταγόνες σχηματίζονται όταν η σχετική υγρασία πάρει πολύ υψηλές τιμές, της τάξεως του 400%. Απ'την άλλη μεριά, η διαδικασία της απ' ευθείας στερεοποίησης των υδρατμών γίνεται αυτόματα μόλις η θερμοκρασία πέσει κάτω από τους -40°C . Ωστόσο, οι παραπάνω διαδικασίες συμπύκνωσης και στερεοποίησης διευκολύνονται από την παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων που μπορούν να δράσουν ως πυρήνες συμπύκνωσης (Cloud Condensation Nuclei,CCN) ή/ και ως πυρήνες παγοποίησης (Ice Nuclei,IN). Έτσι, γίνονται σχηματισμοί υδροσταγόνων με τιμές υπερκορεσμού που δεν ξεπερνούν το 1% και σχηματισμοί παγοκρυστάλλων σε θερμοκρασίες περίπου -15°C .

1.2.1. Αιωρούμενα σωματίδια

Τα αιωρούμενα σωματίδια προέρχονται τόσο από ανθρωπογενείς όσο και από φυσικές πηγές. Η ερημική σκόνη, το θαλάσσιο αλάτι, οι εκπομπές των ηφαιστειών και τα πρωτογενή βιογενή αερολύματα είναι τα φυσικά σωματίδια, ενώ η βιομηχανία, η καύση των υδρογονανθράκων και η καύση της βιομάζας παράγουν ανθρωπογενή σωματίδια. Ο ρόλος των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα είναι δισυπόστατος. Επηρεάζουν με άμεσο και με έμμεσο τρόπο την φυσική της ατμόσφαιρας. Οι διαδικασίες κατά τις οποίες τα αιωρούμενα σωματίδια επιδρούν στη διαμόρφωση των ατμοσφαιρικών συνθηκών και του κλίματος σχετίζονται με την επίδρασή τους στη διάδοση της ακτινοβολίας (direct effects) και με την επίδρασή τους στις διαδικασίες σχηματισμού των νεφών (indirect effects) όπως περιγράφονται συνοπτικά στο Σχήμα 1.5.

Τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν την ιδιότητα να σκεδάζουν και να απορροφούν σε διάφορα μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος,

επιδρώντας, έτσι, στο ισοζύγιο ακτινοβολιών της ατμόσφαιρας (*direct effect*). (Charlson et al., 1992; Myhre et al., 2003; Seinfeld et al., 2004; Ramanathan et al., 2007; IPCC, 2007). Ο ρόλος αυτός των αιωρούμενων σωματιδίων έχει σημαντικές επιδράσεις στην κλιματική αλλαγή. Η δυναμική τροποποίηση που επιφέρουν τα αιωρούμενα σωματίδια στο κλίμα είναι της ίδιας τάξης μεγέθους αλλά αντίθετου πρόσημου σε σχέση με αυτή των αερίων του θερμοκηπίου (Charlson et al., 1992; Jacobson, 2001). Επιπλέον, επιδρούν στο βιοχημικό κύκλο των οικοσυστημάτων τόσο της ξηράς όσο και των ωκεανών ενώ ενδέχεται να έχουν σημαντικές επιδράσεις και στην υγεία του ανθρώπου (Dockery and Pope, 1994; Herut et al., 2002; Meskhidze et al., 2003, 2005; Meskhidze and Nenes, 2006; Mahowald et al., 2008; Mitsakou et al., 2008).

Επειδή τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να δράσουν ως πυρήνες συμπύκνωσης ή/και παγοποίησης στην ατμόσφαιρα, η μεταβολή των συγκεντρώσεων και των χαρακτηριστικών τους έχει επιπτώσεις στη νεφοκάλυψη και εν γένει στα χαρακτηριστικά των νεφών, στη χωρική κατανομή του υετού και γενικώς στον υδρολογικό κύκλο (*indirect aerosol effect*) (Twomey et al., 1977; Albrecht, 1989; De Mott et al., 2003; Sassen et al., 2003; Andreae and Rosenfeld, 2008). Κατά συνέπεια είναι σημαντικός ο καθορισμός των χαρακτηριστικών και της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων για τη μελέτη του ρόλου τους στις διαδικασίες σχηματισμού των νεφών και του υετού (Lohmann and Feichter, 2005; Levin and Cotton, 2009).

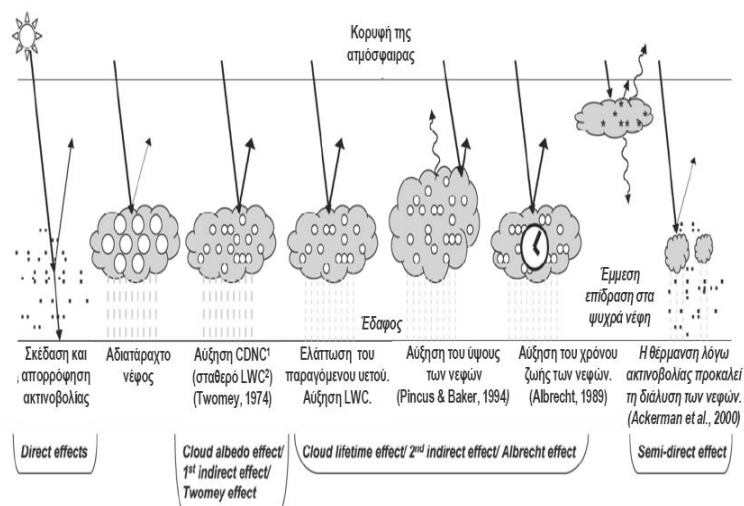
Μία ακόμη σημαντική παράμετρος για την επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα είναι ο χρόνος παραμονής τους μέσα σε αυτήν και η δραστηριότητά τους με τα υπόλοιπα συστατικά της. Η αλληλεπίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων μεταξύ τους έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή δευτερογενών σωματιδίων με διαφορετικά οπτικά χαρακτηριστικά και διαφορετική ικανότητα στην ενεργοποίηση πυρήνων συμπύκνωσης. (Levin et al., 1996; Seinfeld and Pandis, 1998; Wurzler et al., 2000; Jacobson, 2001; Chung and Seinfeld, 2002).

Τα κυριότερα αιωρούμενα σωματίδια φυσικής προέλευσης είναι η ερημική σκόνη και το θαλασσινό αλάτι, ενώ ανθρωπογενούς προέλευσης είναι τα οξείδια του θείου και του φωσφόρου τα οποία αφθονούν στις βιομηχανικές περιοχές.

Τα σωματίδια σκόνης υπολογίζεται ότι αποτελούν περίπου το 50% των αιωρούμενων σωματιδίων (Andreae et al., 1986; Zender et al., 2004) και η μεταφορά τους μπορεί να επηρεάσει τη σύσταση και τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας αρκετές χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά από τις πηγές τους. (Kallos et al., 2007). Έχει βρεθεί ότι, υπό την καθοδήγηση κατάλληλων κινήσεων συνοπτικής κλίμακας, τα σωματίδια της σκόνης που προέρχονται από τις ερήμους της Βόρειας και της Κεντρικής Αφρικής, μεταφέρονται προς τον Ατλαντικό Ωκεανό φτάνοντας μέχρι την Καραϊβική (Karyampudi, 1979; Karyampudi et al., 1999; Prospero et al., 2005; Kallos et al., 2006) ή διασχίζουν τη Μεσόγειο επηρεάζοντας τόσο την ποιότητα του αέρα όσο και τη μετεωρολογία στη Νότια Ευρώπη (Mitsakou et al., 2008; Querol et al., 2009).

Η επίδραση της Αφρικανικής σκόνης στη διάδοση της ακτινοβολίας επιδρά σημαντικά τόσο στην ασιατική μουσωνική κυκλοφορία (Lau et al., 2006; Lau and Kim, 2006) όσο και στη μουσωνική κυκλοφορία της Δυτικής Αφρικής (Lau et al., 2009; Sun et al., 2009). Επιπλέον, τα σωματίδια σκόνης είναι ικανοί πυρήνες παγοποίησης συνεισφέροντας στο σχηματισμό παγοκρυστάλλων στα ψηλά νέφη (De- Mott et al., 2003a; Teller and Levin, 2006).

Ωστόσο, τα σωματίδια σκόνης κατά τη μεταφορά τους στην ατμόσφαιρα αλληλεπιδρούν με σωματίδια αλατιού καθώς και με ανθρωπογενή (κυρίως θειικά και νιτρικά άλατα) προς το σχηματισμό νέων σωματιδίων που αποτελούνται από ένα μείγμα σκόνης και διαλυτών σωματιδίων (Levin et al., 1996). Η επικάλυψη της σκόνης από διαλυτές ουσίες επιτρέπει την ενεργοποίηση τους ως CCN διατηρώντας ταυτόχρονα και την ικανότητά τους να δρουν ως πυρήνες παγοποίησης (IN) (Levin et al., 2006; Astitha and Kallos, 2008; Astitha et al., 2010). Επιπλέον τα μεμονωμένα θειικά άλατα καθώς και τα σωματίδια του θαλασσινού αλατιού είναι ιδιαίτερα ενεργοί πυρήνες συμπύκνωσης και αποτελούν την κυρίαρχη πηγή CCN στο θαλάσσιο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (Gong et al., 2002; Pierce and Adams, 2006).



Σχήμα 1.5: Σχηματικό διάγραμμα των άμεσων και έμμεσων επιδράσεων των αιωρούμενων σωματιδίων με το κλίμα. (IPCC, 2007)

¹CDNC (Cloud Droplet Number Concentration): Συγκέντρωση του αριθμού νεφοσταγόνων.

²LWC (Liquid Droplet Content): Περιεκτικότητα νέφους σε νερό.

1.2.2. Δημιουργία υετού.

Η δημιουργία του υετού στα νέφη μπορεί να γίνει είτε ομογενώς είτε ετερογενώς. Ομογενής συμπύκνωση ονομάζεται η απευθείας συμπύκνωση ή στερεοποίηση των υδρατμών για την δημιουργία νεφοσταγόνων και παγοκρυστάλλων αντίστοιχα.

Η ομογενής συμπύκνωση για την δημιουργία νεφοσταγόνων απαιτεί υψηλά ποσά υπερκορεσμού της τάξεως του 400 % τιμές που δεν συναντιούνται στην ατμόσφαιρα. Η ομογενής στερεοποίηση για τη δημιουργία παγοκρυστάλλων απαιτεί πολύ χαμηλές θερμοκρασίες της τάξεως των $-40\text{ }^\circ\text{C}$. Τέτοιες θερμοκρασίες παρατηρούνται στην κορυφή πολύ υψηλών τροποσφαιρικών νεφών και στα στρατοσφαιρικά νέφη των πολικών περιοχών.

Ετερογενής συμπύκνωση ή παγοποίηση είναι η διαδικασία σχηματισμού υδροσταγόνων ή παγοκρυστάλλων πάνω σε υγροσκοπικά σωματίδια, δηλαδή σωματίδια που έχουν χημική συγγένεια με το νερό και καλούνται πυρήνες συμπύκνωσης (CCN), ή πάνω σε σωματίδια που έχουν εξαγωνική μοριακή δομή παρόμοια με αυτή του πάγου και καλούνται πυρήνες παγοποίησης (IN), αντίστοιχα.

1.2.2.1. Δημιουργία υετού σε θερμά νέφη.

Θερμά νέφη χαρακτηρίζονται τα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης των οποίων οι κορυφές δεν ξεπερνούν το ύψος εκείνο για το οποίο οι θερμοκρασίες είναι μικρότερες των 0°C. Τα νέφη αυτά, λόγω των θερμοκρασιών τους αποτελούνται αποκλειστικά από υδροσταγόνες.

Οι υδροσταγόνες σχηματίζονται πάντοτε όταν η μερική πίεση των υδρατμών γίνει ίση με την μέγιστη τάση των υδρατμών πάνω σε μία επιφάνεια στην αντίστοιχη θερμοκρασία. Οι αλλαγές φάσης παίζουν σημαντικό ρόλο στην δημιουργία και αύξηση των υδροσταγόνων. Η θερμοδυναμική ισορροπία σε ένα σύστημα με νερό σε αέρια και σε υγρή φάση ,περιγράφεται από την εξίσωση Clausius-Clapeyron:

$$\frac{de_s}{dT} = \frac{\varepsilon L_V e_s}{R_d T^2}$$

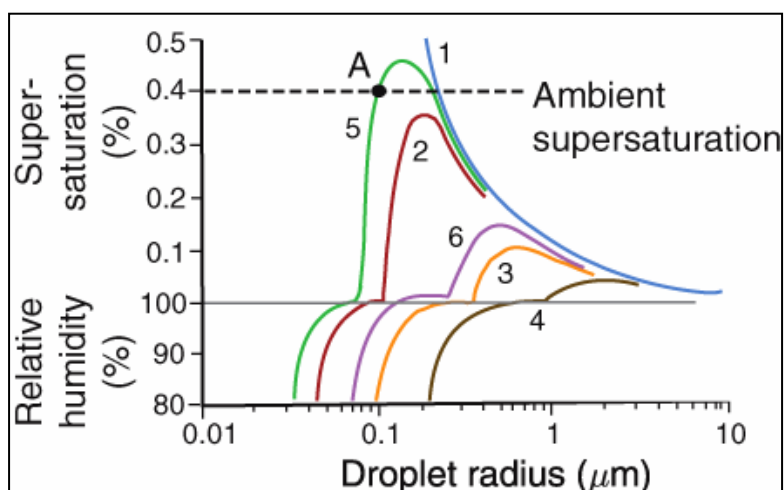
Όπου ε σταθερά ($\varepsilon = 0,622$), L_V η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, R_d η ειδική σταθερά του ξηρού αέρα, T η θερμοκρασία σε °K και e_s η μέγιστη τάση κεκορεσμένων υδρατμών. Όμως η επιφάνεια της υδροσταγόνας είναι σφαιρική και όχι επίπεδη. Επιπλέον, εξαιτίας της ύπαρξης πυρήνων συμπύκνωσης (CCN), πάντοτε στην ατμόσφαιρα, κυριαρχεί η ετερογενής πυρηνοποίηση. Συνεπώς, για τον υπολογισμό της μέγιστης τάσης υδρατμών θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, αφενός η επίδραση της καμπυλότητας της επιφάνειας της υδροσταγόνας, αφετέρου η επίδραση της διαλυμένης ουσίας, η οποία σύμφωνα με το νόμο του Raoult ελαττώνει την μέγιστη τάση. Σύμφωνα με τα παραπάνω η μέγιστη τάση των υδρατμών στην επιφάνεια μιας υδροσταγόνας δίνεται προσεγγιστικά από τη παρακάτω σχέση :

$$e'_s = e_s \left[1 + \frac{a(T)}{r} - \frac{b}{r^3} \right], \text{ όπου } a(T) = \frac{2\sigma}{\rho_L R_V T}$$

,όπου b είναι μία παράμετρος που σχετίζεται με τις ιδιότητες και την μάζα της διαλυμένης ουσίας, σ είναι η επιφανειακή τάση της σταγόνας , ρ_L είναι η πυκνότητα του νερού , R_V είναι η ειδική σταθερά των υδρατμών, T είναι η θερμοκρασία σε °K.

Ο όρος $\frac{a(T)}{r}$ εκφράζει την καμπυλότητα και ο όρος $\frac{b}{r^3}$ την επίδραση της διαλυμένης ουσίας

Τη γραφική παράσταση της παραπάνω σχέσης αποτελούν οι καμπύλες Köhler , που φαίνονται στο Σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6 : Σχηματική απεικόνιση της διακύμανσης της σχετικής υγρασίας και του υπερκορεσμού που αντιστοιχεί σε σταγόνες που αποτελούνται από: (1) καθαρό νερό (μπλε γραμμή), ή που περιέχουν τις παρακάτω μάζες αλάτων: (2) 10-19 kg NaCl (κόκκινη γραμμή), (3) 10-18 kg NaCl (πορτοκαλί γραμμή), (4) 10-17 kg NaCl (καφέ γραμμή), (5) 10-19 kg (NH₄)₂SO₄ (πράσινη γραμμή) και (6) 10-18 kg (NH₄)₂SO₄ (βιολετί). (Rasool, 1973).

Οι τρόποι με τους οποίους αυξάνεται το μέγεθος μιας υδροσταγόνας είναι δύο: i) με συμπύκνωση και ii) με συλλογή.

i. Αύξηση υδροσταγόνων νέφους από συμπύκνωση.

Λόγω μεταφοράς υδατμών ο ρυθμός αύξησης της μάζας της υδροσταγόνας δίνεται από τη σχέση :

$$\frac{dm}{dt} = 4\pi r D (\rho_v - \rho_{vr})$$

Όπου D ο συντελεστής μοριακής διάχυσης , ρ_v η πυκνότητα υδατμών του περιβάλλοντα αέρα και ρ_{vr} η πυκνότητα υδατμών στην επιφάνεια της σταγόνας. Όμως η συμπύκνωση των υδατμών λόγω της θερμότητας που αποδίδει έχει σαν συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της σταγόνας.

Ο ρυθμός μεταβολής του ποσού θερμότητας που επάγεται στην επιφάνεια της υδροσταγόνας δίνεται από τη σχέση :

$$\frac{dm}{dt} = 4\pi r K (T_r - T)$$

Όπου K ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, T η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και T_r η θερμοκρασία στην επιφάνεια της σταγόνας. Στην θερμοδυναμική ισορροπία ισχύει:

$$\frac{\rho_v - \rho_{vr}}{T_r - T} \frac{K}{L_v D}$$

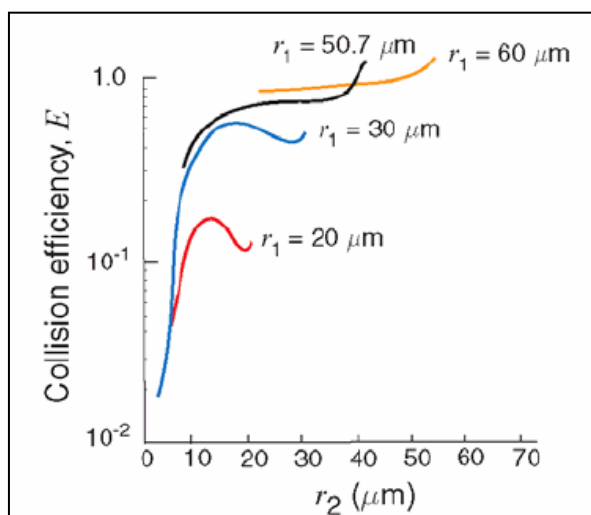
Το 1971 ο Mason έδωσε την αριθμητική επίλυση για τον ρυθμό αύξησης της υδροσταγόνας από συμπύκνωση :

$$r \frac{dr}{dt} = \frac{S - 1}{F_K + F_D}$$

Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι ο ρυθμός αύξησης της ακτίνας της υδροσταγόνας είναι αντιστρόφως ανάλογος με την ακτίνα της (Battan, L.J., 1973).

ii. Αύξηση σταγόνων νέφους με την διεργασία της συλλογής.

Κατά τη διεργασία αυτή οι μεγαλύτερες σταγόνες συλλέγουν ένα ποσοστό από τις μικρότερες με τις οποίες συγκρούονται καθώς πέφτουν μέσα στο νέφος. Η συλλογή μπορεί να είναι συνεχής ή στοχαστική. Κατά την πρώτη ένας ορισμένος αριθμός υδροσταγόνων αυξάνει ομοιόμορφα σε μέγεθος ενώ ο αριθμός παραμένει ο ίδιος και στη δεύτερη περίπτωση ένα μέρος από τον δεδομένο αριθμό υδροσταγόνων αυξάνει σε πολύ μεγαλύτερες ενώ παραμένει ένα ποσοστό σταγόνων αρχικού μεγέθους. Η διεργασία της συλλογής εξαρτάται κατά πολύ από την οριακή ταχύτητα των υδροσταγόνων. Η οριακή ταχύτητα των σταγόνων είναι ανάλογη της ακτίνας τους. Η διαδικασία της συλλογής δύο σταγόνων προϋποθέτει προηγουμένως την σύγκρουσή τους. Επειδή όμως, όταν μία σταγόνα ακτίνας R συναντήσει στην πορεία της μία σταγόνα με ακτίνα r τότε καθώς πλησιάζουν, μπορεί η συλλεγόμενη σταγόνα να ακολουθήσει τις ρευματογραμμές της συλλέκτριας σταγόνας κι έτσι να μην πραγματοποιηθεί σύγκρουση.



Σχήμα 1.7: Τιμές του συντελεστή συλλογής (collection efficiency) μεταξύ σταγόνων ακτίνας r_1 και σταγόνων ακτίνας r_2 . (Pruppacher and Klett, 1997).

Συνεπώς ορίζεται ο συντελεστής ικανότητας σύγκρουσης δύο σταγόνων E ως ο λόγος της ενεργούς διατομής προς τη γεωμετρική διατομή:

$$E = \frac{\pi Y c^2}{\pi(R + r)^2}$$

Σχήμα 1.7: Τιμές του συντελεστή συλλογής (collection efficiency) μεταξύ σταγόνων ακτίνας r_1 και σταγόνων ακτίνας r_2 . (Pruppacher and Klett, 1997).

Από τον αριθμό των σταγόνων που συγκρούονται ένα ποσοστό μόνο συλλέγονται. Έτσι, ορίζεται και ο συντελεστής συνένωσης E' . Τελικά η αύξηση των σταγόνων λόγω συλλογής εξαρτάται από τον συντελεστή συλλογής $E_c = EE'$. Ο συντελεστής συλλογής είναι συνάρτηση των ακτινών της συλλέκτριας και της συλλεγόμενης σταγόνας. Για σταγόνες με ακτίνα μικρότερη των $20 \mu\text{m}$ είναι ο συντελεστής σύγκρουσης είναι σχεδόν μηδενικός, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.7.

Συνήθως ο συντελεστής συνένωσης θεωρείται μονάδα. Στο μοντέλο της συνεχούς συλλογής ο ρυθμός αύξησης της ακτίνας μιας υδροσταγόνας δίνεται από τον τύπο :

$$\frac{dR}{dz} = \frac{\bar{E} M}{4\rho_L w} \frac{u(R)}{w - u(R)}$$

Όπου \bar{E} ο μέσος συντελεστής συλλογής είναι, M η περιεκτικότητα του νέφους σε νερό, $u(R)$ η οριακή ταχύτητα πτώσης των σταγόνων, ρ_L η πυκνότητα του νερού και w το ανοδικό ρεύμα. Όπως φαίνεται από τη παραπάνω σχέση ρυθμός αύξησης της υδροσταγόνας είναι ανάλογος της ακτίνας της.

Μια ενδιαφέρουσα πρόοδος στην μικροφυσική των νεφών ήταν η αντικατάσταση του μοντέλου συνεχούς συλλογής από τα στοχαστικά μοντέλα. Στα μοντέλα αυτά θεωρείται ότι οι συγκρούσεις είναι μεμονωμένα γεγονότα και ακολουθούν μια στατιστική κατανομή στο χώρο και στον χρόνο.

Αν ο αριθμός των σταγόνων μεγέθους i στον χρόνο t και ΔN_i είναι ο αριθμός των σταγόνων που έχουν μεταβεί σε ένα επόμενο μέγεθος μετά από χρόνο Δt , ορίζεται η πιθανότητα:

$$P_i = \lim \frac{\Delta N_i}{N_i \Delta t}.$$

Ως το ποσοστό των υδροσταγόνων που έχουν μεταβεί από το μέγεθος i στο μέγεθος $i + 1$. Άρα, ο αριθμός σταγόνων στο χρόνο θα δίνεται από τη σχέση :

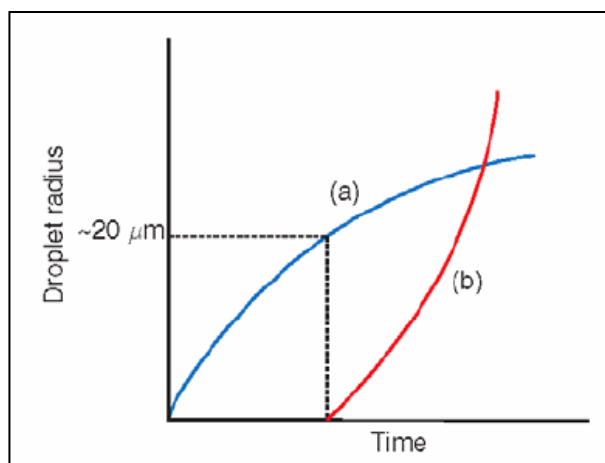
$$N_i(t + \Delta t) = N_i(t)(1 - P_i \Delta t) + N_{i-1}(t)(P_{i-1} \Delta t)$$

Όπου ο πρώτος όρος εκφράζει την ελάττωση του αριθμού των σταγόνων μεγέθους i διότι ένα ποσοστό αυτών έχει συλλεχθεί από μεγαλύτερες σταγόνες και έχει μεταβεί στο μέγεθος $i + 1$. Ο δεύτερος όρος εκφράζει την αύξηση του αριθμού των σταγόνων i μετά από χρόνο Δt εξ' αιτίας των συγκρούσεων μικρότερων σταγόνων που έχουν συλλεχθεί ώστε να αποκτήσουν μέγεθος i . Άρα:

$$\frac{N_i(t+\Delta t) - N_i(t)}{\Delta t} = \frac{dN_i}{dt} = P_{i-1}N_{i-1}(t) - P_i N_i(t),$$

είναι ο τύπος που δίνει την χρονική εξέλιξη της φασματικής κατανομής των ακτινών των σταγόνων από το συνδυασμό συμπύκνωσης και στοχαστικής συλλογής.

Συνοψίζοντας, επειδή ο συντελεστής σύγκρουσης έχει την τιμή μηδέν για σταγόνες ακτίνας μικρότερης των $20 \mu\text{m}$, η διαδικασία της συμπύκνωσης κυριαρχεί μέχρι η μέση ακτίνα των σταγόνων του νέφους να γίνει περίπου $20 \mu\text{m}$. Στη συνέχεια, η διαδικασία αυτή αδρανεύει και κυριαρχεί η διαδικασία της συλλογής Σχήμα 1.8.



Σχήμα 1.8: Σχηματική αναπαράσταση του ρυθμού αύξησης μιας σταγόνας νέφους από συμπύκνωση (μπλε γραμμή) και από συλλογή (κόκκινη γραμμή). Στον κατακόρυφο άξονα είναι η ακτίνα της σταγόνας και στον οριζόντιο ο χρόνος. (Wallace and Hobbs 2006).

1.2.2.2. Δημιουργία υετού σε ψυχρά νέφη

Ψυχρό είναι το νέφος εκείνο η κορυφή του οποίου εκτείνεται σε ύψος όπου η θερμοκρασία είναι μικρότερη των $0 \text{ } ^\circ\text{C}$. Άρα στα ψυχρά νέφη περιέχονται ταυτόχρονα και οι τρεις φάσεις του νερού· υγρή, αέρια και στερεή. Μάλιστα έχει παρατηρηθεί ότι σε θερμοκρασίες μικρότερες των -15°C μπορεί να συνυπάρχουν μέσα στο νέφος σταγόνες σε υπέρτηξη και παγοκρύσταλλοι. Οι σταγόνες σε υπέρτηξη είναι σταγόνες που βρίσκονται σε υγρή μορφή σε θερμοκρασίες μικρότερες των $0 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Ο σχηματισμός του στοιχειώδους παγοκρυστάλλου μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Την συμπύκνωση των υδρατμών απ' ευθείας σε πάγο (deposition) ή την πήξη μιας υδροσταγόνας. Στη φύση όμως, επειδή υπάρχουν πυρήνες παγοποίησης οι οποίοι διευκολύνουν τον σχηματισμό πρωτογενών παγοκρυστάλλων, κυριαρχεί η δημιουργία παγοκρυστάλλων πάνω σε πυρήνες παγοποίησης (ετερογενής πυρηνοποίηση).

Γενικά, οι πυρήνες παγοποίησης αρχίζουν να ενεργοποιούνται σε θερμοκρασίες μικρότερες των $-12^{\circ}C$, έτσι οι παγοκρύσταλλοι εμφανίζονται στα νέφη όταν η θερμοκρασία τους πέσει κάτω από τους $-15^{\circ}C$. Παρ' όλο που οι πυρήνες συμπύκνωσης είναι άφθονοι στη φύση, οι πυρήνες παγοποίησης είναι αρκετά σπάνιοι και αυξάνουν κατά μία τάξη μεγέθους όταν η θερμοκρασία μέσα στο νέφος ελαττώνεται κατά $5^{\circ}C$.

Η ύπαρξη παγοκρυστάλλων στα ψυχρά νέφη παίζει σπουδαίο ρόλο καθώς μεγάλο ποσοστό βροχής που έρχεται στο έδαφος ξεκινάει από παγοκρυστάλλους σε νέφη με θερμοκρασίες μικρότερες των $0^{\circ}C$ (Wegener, 1911; Bergeron, 1935).

Η αύξηση των παγοκρυστάλλων γίνεται με δύο διαδικασίες: α) την απ' ευθείας συμπύκνωση υδρατμών στην επιφάνειά τους και β) την συνένωση παγοκρυστάλλων ή την πρόσληψη σταγόνας σε υπέρτηξη.

i. Αύξηση παγοκρυστάλλου με συμπύκνωση.

Η διαδικασία αυτή είναι ανάλογη με τη διαδικασία αύξησης της υδροσταγόνας με συμπύκνωση. Με την διαφορά όμως ότι ο παγοκρύσταλλος δεν έχει σφαιρικό σχήμα. Ο Houghton θεώρησε ότι η μεταφορά υδρατμών πάνω σε ένα παγοκρύσταλλο είναι ανάλογη με τη μεταφορά φορτίου πάνω σε αγωγό. Η μεταφορά του φορτίου εξαρτάται από την χωρητικότητα του αγωγού. Έτσι, αν θεωρήσουμε C την χωρητικότητα του παγοκρυστάλλου, τότε ο ρυθμός αύξησης της μάζας ενός παγοκρυστάλλου δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{4\pi C(S_i - 1)}{F_k + F_D}$$

Η χωρητικότητα του παγοκρυστάλλου είναι :

- $C = r$, για σφαίρα,
- $C = \frac{2r}{\pi}$, για μορφή πλακιδίου και
- $C = \frac{A}{\ln\left(\frac{a+A}{b}\right)}$, για σφαιροειδές, όπου a και b οι άξονες του σφαιροειδούς και

$$A = \sqrt{a^2 - b^2}$$

$S_i = S(e_{sw}/e_i)$ είναι η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος σε σχέση με τον πάγο. Ο λόγος της μέγιστης τάσης των υδρατμών πάνω στο νερό προς τη μέγιστη τάση των υδρατμών πάνω στον πάγο $\frac{e_{sw}}{e_i}$ είναι μεγαλύτερος της μονάδας για όλες τις θερμοκρασίες μικρότερες των $0\text{ }^\circ\text{C}$ και λαμβάνει την τιμή 1.5 στους $-40\text{ }^\circ\text{C}$. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η συνύπαρξη παγοκρυστάλλων και σταγόνων σε υπέρτηξη να οδηγεί στην εξάτμιση των σταγόνων και στην μεταφορά των υδρατμών προς αύξηση των παγοκρυστάλλων. Ο ρυθμός αύξησης της μάζας μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την πίεση και τη θερμοκρασία και παρουσιάζει μέγιστο στην περιοχή θερμοκρασιών $-12\text{ }^\circ\text{C}$ ως $-17\text{ }^\circ\text{C}$. (Dennis, A., S., 1980)

ii. Αύξηση παγοκρυστάλλων λόγω συνένωσης.

Ένας παγοκρύσταλλος μέσα στο νέφος μπορεί να αυξηθεί σε μέγεθος με τη διαδικασία της συνένωσης προσλαμβάνοντας είτε κάποιον άλλο παγοκρύσταλλο (aggregation) είτε σταγόνα σε υπέρτηξη (riming). Στην πρώτη περίπτωση το αποτέλεσμα είναι σωματίδιο κρυσταλλικής δομής, όπως είναι η νιφάδα χιονιού. Στη δεύτερη περίπτωση το αποτέλεσμα είναι άμορφα σωματίδια μη κρυσταλλικής δομής (graupel), όπως είναι το χαλάζι. Ο ρυθμός αύξησης της μάζας του παγοκρυστάλλου λόγω συνένωσης, με κάποιες προσεγγίσεις δίνεται από τον τύπο :

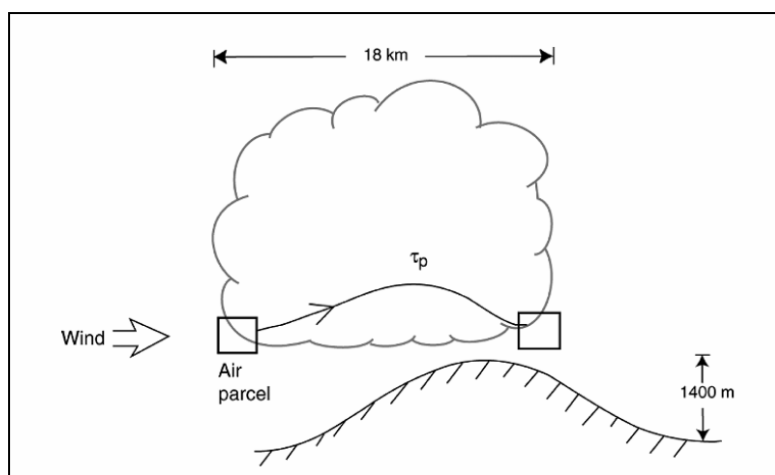
$$\frac{dm}{dt} = \bar{E} M \pi R^2 u(R)$$

Όπου m η μάζα του παγοκρυστάλλου και M (gr/cm^3) η περιεκτικότητα του νέφους σε νερό. Το R είναι η ισοδύναμη ακτίνα του σωματιδίου, δηλαδή η ακτίνα που θα είχε το σωματίδιο εάν ήταν σε υγρή μορφή. Τέλος, $u(R)$ είναι η οριακή ταχύτητα του παγοκρυστάλλου και \bar{E} ο μέσος συντελεστής συλλογής του παγοκρυστάλλου που μπορεί να θεωρηθεί μονάδα.

1.2.2.3. Δημιουργία υετού σε ορογραφικά νέφη.

Οι αέριες μάζες όταν συναντούν έντονη ορογραφία, εξαναγκάζονται σε ανοδική κίνηση. Το αποτέλεσμα αυτής της κίνησης είναι η δημιουργία νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης, που ονομάζονται ορογραφικά (orographic clouds). Οι κατακόρυφες κινήσεις που επικρατούν στα νέφη αυτά εξαρτώνται από τα

χαρακτηριστικά του επικρατούντος ανέμου αλλά και από χαρακτηριστικά της τοπογραφίας. Οι ταχύτητες που αναπτύσσονται στα νέφη είναι της τάξης μεγέθους των αρκετών μέτρων ανά δευτερόλεπτο. Το περιεχόμενό τους σε νερό είναι της τάξης μερικών δεκάδων γραμμαρίων ανά κυβικό μέτρο και ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες μπορεί να διαρκούν από μερικά λεπτά έως αρκετές ώρες. Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες κατηγορίες νεφών, ο διαθέσιμος χρόνος για τη δημιουργία κατακρημνισμάτων, λανγκρανζιανή κλίμακα, σε αυτά τα νέφη καθορίζεται από τον χρόνο που χρειάζεται η αέρια μάζα για να μεταφερθεί οριζοντίως από την προσήνεμη πλευρά του βουνού στην υπήνεμη Σχήμα 1.9. Επειδή τα νέφη αυτά περιέχουν χαμηλά ποσά νερού, οι μικροφυσικές διεργασίες μετατροπής των υδροσταγόνων σε σταγόνες βροχής καθορίζουν σημαντικά τις ποσότητες υετού που ενδεχομένως θα δώσουν. Γενικά, τα νέφη αυτά είναι αρκετά ευαίσθητα στις μεταβολές της συγκέντρωσης και του είδους των πυρήνων συμπύκνωσης και συνεπώς στις τεχνικές τροποποίησης καιρού.



Σχήμα 1.9: Σχηματικό διάγραμμα για τη μηχανική ανύψωση του αέρα λόγω ορογραφικού εμποδίου. Τα νέφη που σχηματίζονται στην προσήνεμη πλευρά του βουνού εμφανίζουν σημαντική κατακόρυφη ανάπτυξη που μπορεί να φτάσει τα 15-18 km. (Levin and Cotton 2009).

1.2.2.4. Καταιγίδα

Καταιγίδα είναι φαινόμενο που χαρακτηρίζεται από έντονη βροχόπτωση, έντονους ανέμους μεταβλητής ταχύτητας και διεύθυνσης και ηλεκτρικές εκκενώσεις που συχνά συνοδεύονται από χαλάζι. Δημιουργούνται λόγω διαφοράς στην πυκνότητα του ζεστού ή υγρού και ψυχρού ή ξηρού αέρα

αντίστοιχα. Ο υγρός αέρας έχει μικρότερη πυκνότητα από τον ψυχρό και ο υγρός αέρας έχει μικρότερη πυκνότητα από τον ξηρό. Έτσι όταν ο αέρας γίνεται πιο ζεστός ή υγρός, αρχίζει να κινείται κατακόρυφα προς τα επάνω. Καθώς ο ζεστός ή υγρός αέρας ανέβει ψηλά ,ψύχεται. Τότε, οι υδρατμοί αρχίζουν να συμπυκνώνονται. Όταν οι υδρατμοί συμπυκνώνονται ελευθερώνουν ενέργεια ,η οποία ζεσταίνει τον αέρα κρατώντας τον πιο ζεστό από το περιβάλλον, με αποτέλεσμα να συνεχίζει την άνοδό του. Εάν, η ατμόσφαιρα είναι αρκετά ασταθής, τότε οι ανοδικές κινήσεις μπορούν να φθάσουν αρκετά ψηλά ώστε να δημιουργηθούν καταιγιδοφόρα νέφη τύπου Cb.

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι καταιγίδων· η καταιγίδα που αποτελείται από ένα κύτταρο (single cell storm), η καταιγίδα που αποτελείται από πολλά κύτταρα (multicell storm) και η καταιγίδα που αποτελείται από ένα «υπερκύτταρο» (supercell storm). Ανεξάρτητα, όμως από τον τύπο της καταιγίδας, τα στάδια ανάπτυξης είναι τρία: αρχικό στάδιο ανάπτυξης (cumulus stage), στάδιο ωρίμανσης (mature stage) και στάδιο εξασθένησης (dissipating stage), όπως φαίνονται σχηματικά και στο Σχήμα 1.10.

Cumulus Stage

Κατά τη διάρκεια του αρχικού σταδίου ανάπτυξης (cumulus stage) μιας καταιγίδας, υγρές και θερμές αέριες μάζες αρχίζουν τις ανοδικές κινήσεις. Τέτοιες ανοδικές κινήσεις μπορούν να πυροδοτηθούν είτε από θέρμανση των επιφανειακών αερίων μαζών από επαφή με το ζεστό, λόγω ακτινοβολίας, έδαφος , είτε από τη σύγκλιση αερίων μαζών λόγω τοπογραφίας ή δυναμικών παραγόντων. Οι υδρατμοί της αέριας μάζας, λόγω ψύξης, συμπυκνώνονται σε μικρές υδροσταγόνες κι έτσι σχηματίζονται τα νέφη τύπου Cu. Καθώς, οι υδρατμοί συμπυκνώνονται, εκλύεται λανθάνουσα θερμότητα η οποία θερμαίνει τον υγρό αέρα ,θέτοντάς τον εκ νέου σε ανοδική κίνηση. Έτσι, κάτω από την καταιγίδα παρουσιάζεται πτώση της ατμοσφαιρικής πίεσης.

Mature Stage

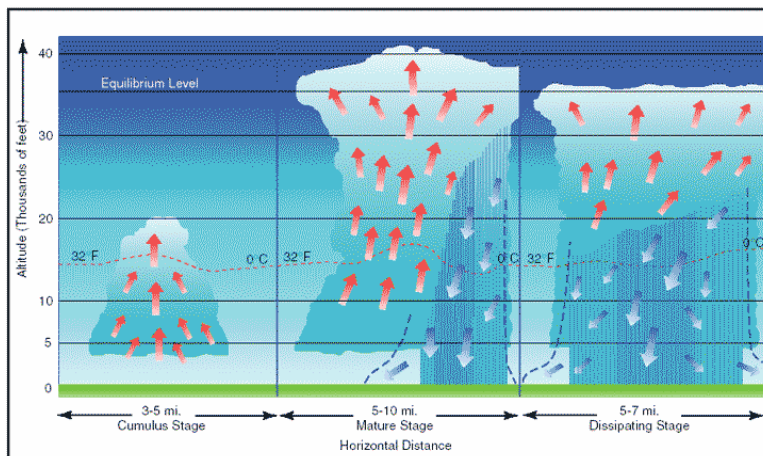
Σε αυτό το στάδιο ανάπτυξης η αέρια μάζα συνεχίζει την ανοδική κίνηση μέχρι να συναντήσει ζεστότερο περιβάλλον. Συχνά ,το όριο για την ανοδική κίνηση είναι το επίπεδο αναστροφής της Τροπόπαυσης. Εφόσον ο αέρας σε

αυτό το επίπεδο δεν μπορεί να ανέλθει προς τα πάνω, αρχίζει να απλώνεται, δίνοντας το χαρακτηριστικό σχήμα αμονίου στην κορυφή του νέφους. Οι σταγόνες του νέφους αυξάνονται σε μέγεθος με την διαδικασία της συλλογής και παγώνουν σχηματίζοντας σωματίδια πάγου. Τα σωματίδια αυτά είτε λιώνουν κατά την καθοδική τους κίνηση και πέφτουν με την μορφή χιονιού , είτε εάν τα ανοδικά ρεύματα μέσα στο νέφος είναι πολύ ισχυρά , παραμένουν αρκετοί ώρα μέσα στο νέφος ,μεγαλώνουν σε μέγεθος και κατά την καθοδική τους κίνηση δεν προλαβαίνουν να λιώσουν τελείως και πέφτουν σαν χαλάζι. Η πτώση του υετού δημιουργεί καθοδικά ρεύματα .Ωστόσο ,τα ανοδικά ρεύματα εξακολουθούν να υπάρχουν. Η συνύπαρξη ταυτόχρονα και των ανοδικών και των καθοδικών ρευμάτων, σηματοδοτεί το στάδιο ωρίμανσης, κατά την διάρκεια του οποίου δημιουργείται εσωτερική τύρβη στο νέφος που εκδηλώνεται με έντονους ανέμους και ηλεκτρικά φαινόμενα.

Συνήθως, εάν η διάτμηση του ανέμου είναι μικρή, τότε η καταιγίδα θα εισέλθει γρήγορα στο τελικό στάδιο της ωρίμανσης και θα αποδυναμωθεί. Εάν, όμως υπάρξει αλλαγή στην ταχύτητα ή την διεύθυνση του ανέμου ,τότε τα ανοδικά και καθοδικά ρεύματα της καταιγίδας θα διαχωριστούν και θα δημιουργηθεί ένα κύτταρο καταιγίδας με αυτόνομη δυναμική (supercell) το οποίο μπορεί να παραμείνει στο στάδιο της ωρίμανσης για πολλές ώρες και να τροφοδοτείται από τον εαυτό του. Ωστόσο, σε μερικές περιπτώσεις, ακόμα και όταν η διάτμηση του ανέμου είναι μικρή ,εάν οι θερμοδυναμικές συνθήκες της ατμόσφαιρας το ευνοούν, η καταιγίδα μπορεί να παραμείνει περισσότερο χρόνο στο στάδιο της ωρίμανσης.

Dissipating Stage

Σε αυτό το στάδιο τα καθοδικά ρεύματα της καταιγίδας αναπτύσσονται, χτυπούν το έδαφος και εξαπλώνονται οριζόντια. Ο κρύος αέρας που μεταφέρεται από τα καθοδικά ρεύματα αποκόπτει την τροφοδότηση της καταιγίδας με αποτέλεσμα τα ανοδικά ρεύματα να εξαφανίζονται και η καταιγίδα να εξασθενεί.



Σχήμα 1.10: Στάδια ανάπτυξης καταιγίδας. Στο αρχικό (*cumulus*) στάδιο υπάρχουν ανοδικά ρεύματα. Στο στάδιο της ωρίμανσης (*mature*) ξεκινά ο υετός ο οποίος συνοδεύεται από καθοδικά ρεύματα που συνυπάρχουν με τα κυρίαρχα ανοδικά ρεύματα. Στο τελικό στάδιο (*dissipating*) ο υετός δημιουργείται από ολόκληρη την έκταση του νέφους, τα καθοδικά ρεύματα που τον συνοδεύουν κυριαρχούν και η καταιγίδα αρχίζει να διαλύεται.

1.3. Τροποποίηση καιρού.

Η τροποποίηση καιρού είναι ο επιστημονικός κλάδος της Μετεωρολογίας, που ασχολείται με την διαχείριση των μετεωρολογικών συστημάτων μέσης κλίμακας. Ένας από τους βασικούς σκοπούς του κλάδου αυτού είναι η προστασία καλλιεργειών αλλά και του ανθρώπινου πληθυσμού από ακραία καιρικά φαινόμενα. Φαινόμενα όπως είναι οι καταιγίδες και το χαλάζι ή και πιο καταστροφικά, όπως οι τροπικοί κυκλώνες είναι αντικείμενα τροποποίησης καιρού. Ακόμη, η τροποποίηση καιρού μπορεί να αποτελέσει εργαλείο για την διαχείριση των υδάτων με σκοπό την τροφοδότηση περιοχών, χωρίς αποθέματα νερού αλλά και για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κύριες μέθοδοι τροποποίησης καιρού είναι δύο· η εναέρια σπορά νεφών (cloud seeding) και η σπορά νεφών με επίγειες γεννήτριες (ground generators). Στην πρώτη περίπτωση η σπορά των νεφών γίνεται στο ύψος της βάσης ή της κορυφής του νέφους ,ενώ στη δεύτερη περίπτωση η σπορά του νέφους γίνεται από το επίπεδο του εδάφους με γεννήτριες παραγωγής κατάλληλων σωματιδίων. Ανάλογα με το είδος των σωματιδίων που χρησιμοποιούνται, η σπορά των νεφών χωρίζεται σε δύο τύπους: glaciogenic seeding και hygroscopic seeding.

Το δημοφιλέστερο υλικό που χρησιμοποιείται για την σπορά των νεφών είναι ο ιωδιούχος άργυρος (AgI), ο οποίος έχει κρυσταλλική δομή παρόμοια με αυτή του πάγου. Η αποτελεσματικότητά του να δρά ως πυρήνας παγοποίησης (IN) εξαρτάται από την διαδικασία σχηματισμού των μορίων του και της διαμέτρου τους. Η παραγωγή καπνού ιωδιούχου αργύρου μπορεί να γίνει είτε εξατμίζοντας τον ιωδιούχο άργυρο απευθείας θερμαίνοντάς τον με ένα καυτό σύρμα, είτε καίγοντας διάλυμα ιωδιούχου αργύρου μέσα σε προπανόνη (acetone $(CH_3)_2CO$). Στον Πίνακα 2 φαίνονται οι χημικές ιδιότητες του ιωδιούχου αργύρου.

Ένα άλλο υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην σπορά των νεφών, το οποίο λειτουργεί περισσότερο έμμεσα είναι το υγρό προπάνιο . Το υγρό αυτό μπορεί να ελευθερωθεί μέσα στα νέφη και ,προκαλώντας τοπικά μεγάλη πτώση της θερμοκρασίας μέχρι και $-100^{\circ}C$, να συμπυκνώσει τους υδρατμούς δημιουργώντας μικροσκοπικούς παγοκρυστάλλους , οι οποίοι στη συνέχεια θα ακολουθήσουν την διαδικασίας ανάπτυξής τους. Η χρήση του υγρού προπανίου είναι λιγότερο δαπανηρή, ωστόσο για να μπορεί να είναι

αποτελεσματική θα πρέπει οι γεννήτριες παραγωγής του αερίου να βρίσκονται μέσα στο νέφος (Arlin B. Super and James A. Heimbach,2005). Ανάλογη συμπεριφορά έχει και η χρήση ξηρού πάγου (στερεό CO_2).

Πίνακας 2

Χημικές ιδιότητες ιωδιούχου αργύρου (AgI) και προπανίου (C_3H_8)

	AgI	C_3H_8
Μοριακή μάζα (molecular mass)	234.7722 g/mol	44.1 g/mol
Πυκνότητα (density)	5.675 g/cm ³ , solid	2.0098 mg/cm ³ , gas (STP)
Σημείο τήξης (Melting Point)	558 °C	-188 °C
Σημείο Βρασμού (Boiling Point)	1506°C	-42 °C
Διαλυτότητα στο νερό (Solubility in water)	3×10^{-7} g/100ml (20°C)	4×10^{-3} g/100 ml (0°C)
Συντελεστής Van't Hoff (Van't Hoff factor)	1	1

1.3.1. Hygroscopic seeding

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στα θερμά νέφη ή στα νέφη που περιέχουν ταυτόχρονα την υγρή και στερεή φάση του νερού. Μεγάλα υγροσκοπικά σωματίδια, όπως σωματίδια αλάτων και παράγωγα καύσης, εισέρχονται στο νέφος με σκοπό να αυξήσουν την συγκέντρωση των σταγόνων, που με τη διαδικασία της συλλογής, θα συλλέξουν μικρότερες σταγόνες και θα μεγαλώσουν σχηματίζοντας σταγόνες βροχής. Η σταγόνες αυτές εάν οι θερμοκρασίες είναι μικρότερες του μηδενός μπορούν να βρίσκονται σε υπέρτηξη ευνοώντας την δημιουργία παγοκρυστάλλων.

Η παραπάνω μέθοδος μπορεί να είναι αποτελεσματική ακόμα και σε περιπτώσεις τροποποίησης ορογραφικών νεφών κατά την διάρκεια του χειμώνα. Αυτό συμβαίνει διότι η αύξηση της συγκέντρωσης των υγροσκοπικών πυρήνων μέσα στο νέφος μπορεί να αντισταθμίσει τις αρνητικές επιδράσεις στον υετό, που επιφέρουν οι μεγάλες συγκεντρώσεις CCN σε αέριες μάζες με ρύπους.

1.3.2. Glaciogenic seeding

Στη μέθοδο αυτή η σπορά του νέφους γίνεται με σωματίδια τα οποία ευνοούν το σχηματισμό πρωτογενών παγοκρυστάλλων, ενισχύοντας έτσι την παραγωγή υετού. Το αντικείμενο της μεθόδου αυτής είναι να εισαχθούν μέσα στο νέφος σωματίδια τα οποία θα παράγουν τη βέλτιστη συγκέντρωση παγοκρυστάλλων που χρειάζεται για τον σχηματισμό βροχής. Το μέγεθος της συγκέντρωσης αυτής εξαρτάται από ειδικά χαρακτηριστικά του νέφους αλλά και από την συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων που προϋπάρχουν στην αέρια μάζα του νέφους.

Πρόσφατα πειράματα και αριθμητικές προσομοιώσεις συνιστούν ότι η ευκαιρία για ενίσχυση της βροχόπτωσης μέσω του glaciogenic seeding περιορίζεται από τους παρακάτω παράγοντες :

- Ηπειρωτικά νέφη τα οποία έχουν σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες στην βάση τους,
- Νέφη με θερμοκρασίες κορυφής μεταξύ -10°C και -25°C .
- Τον χρόνο που είναι διαθέσιμος για τον σχηματισμό βροχής.

Το παράθυρο θερμοκρασιών μεταξύ -10°C και -25°C είναι κρίσιμο διότι , σε θερμοκρασίες μικρότερες των -25°C οι φυσικές συγκεντρώσεις παγοκρυστάλλων είναι αρκετά μεγάλες και η σπορά μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα «overseeded» νέφη δημιουργώντας πολλούς μικρούς παγοκρυστάλλους, οι οποίοι επειδή είναι μεγάλοι σε πλήθος ,δεν έχουν περιθώριο περαιτέρω ανάπτυξης ,ώστε ,τελικά, να δώσουν φαινόμενα υετού. Από την άλλη μεριά, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την σπορά είναι λιγότερο αποτελεσματικά σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των -10°C .

Η χρονική στιγμή που θα γίνει η σπορά των νεφών είναι επίσης πολύ σημαντική . Εάν οι άνεμοι είναι ασθενείς ,τότε υπάρχει αρκετός χρόνος ώστε να ολοκληρωθεί αποτελεσματικά η φυσική διαδικασία της δημιουργίας βροχής. Ισχυρότεροι άνεμοι ,όμως, λειτουργούν ανασταλτικά στην φυσική διαδικασία σχηματισμού βροχής , με αποτέλεσμα η σπορά των νεφών να την επιταχύνει. Ωστόσο, σε συνθήκες πολύ ισχυρών ανέμων, επειδή , ακόμα και μετά τη σπορά των νεφών, οι χρονικές κλίμακες των φαινομένων είναι μικρές, οι παγοκρύσταλλοι δεν προλαβαίνουν να μετασχηματιστούν σε βροχή στην υπήνεμη πλευρά του βουνού.

1.4. Ενδιαφέρον επιστημονικής κοινότητας.

Η επιστημονική κοινότητα τρέφει μεγάλο ενδιαφέρον για το αντικείμενο της μικροφυσικής των νεφών. Είναι ένα θέμα το δεν έχει διερευνηθεί πλήρως. Το ενδεχόμενο η τροποποίηση καιρού να ενισχύει τον παραγόμενο υετό δεν έχει αποσαφηνιστεί πλήρως. Η Αμερικάνικη Μετεωρολογική Κοινότητα υποστηρίζει ότι υπάρχουν στατιστικές ενδείξεις για 10% αύξηση της χειμωνιάτικης βροχόπτωσης με σπορά νεφών, απο την άλλη το Πανεπιστήμιο του Ισραήλ θέτει τα ποσοστά αυτά υπό συζήτηση.

Στο κλάδο της τροποποίησης καιρού είναι δύσκολη η γενίκευση των αποτελεσμάτων καθώς τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα είναι πολυπαραγοντικά. Οι δυσκολίες που αντιμετωπίζονται αναφέρονται κυρίως:

- Στην ανίχνευση της επίδρασης της σποράς και ο διαχωρισμός της από τον φυσικό υετό.
- Στις διαφορετικές χωρικές και χρονικές κλίμακες των αποτελεσμάτων σε σχέση με της επιχειρησιακές.
- Δεν είναι εφικτή η επανάληψη των επιχειρήσεων κάτω από τις ίδιες ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες.
- Το κόστος των επιχειρήσεων είναι υψηλό.

Έτσι, λοιπόν η χρήση των ατμοσφαιρικών μοντέλων μπορεί να βοηθήσει στην αντιμετώπιση των παραπάνω δυσκολιών, κάνοντας συμπληρωματικές εφαρμογές των μοντέλων σε συνδυασμό με πειράματα πεδίου.

Κεφάλαιο 2 ° : Περιγραφή των γενικών χαρακτηριστικών του αριθμητικού μοντέλου RAMS

2.1. RAMS.

Το ατμοσφαιρικό μοντέλο RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) είναι ένα αριθμητικό μοντέλο πολλαπλών εφαρμογών, που αναπτύχθηκε στο Colorado State University σε συνεργασία με την Mission Research Corporation/Aster division για προσομοίωση και πρόγνωση μετεωρολογικών φαινομένων και για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων (Pielke et al. 1992) και συνεχίζει να εξελίσσεται από διάφορες ερευνητικές ομάδες. Επιτρέπει προσομοιώσεις ατμοσφαιρικών φαινομένων σε κλίμακες από μερικές δεκάδες μέτρα μέχρι και μερικές χιλιάδες μέτρα. Βασίστηκε σε δύο προγενέστερα ατμοσφαιρικά μοντέλα της δεκαετίας του '70 των William Cotton και Roger Pielke οι οποίοι μάλιστα επέβλεψαν την κατασκευή του νέου κώδικα RAMS (ο οποίος σήμερα είναι αποκλειστικά σχεδόν γραμμένος σε FORTRAN 90).

Μερικές από τις δυνατότητες του RAMS είναι ότι διαθέτει: δομή αμφίδρομων επάλληλων πλεγμάτων, σύστημα κατακόρυφων συντεταγμένων που ακολουθούν την τοπογραφία, παραμετροποιημένο σχήμα μικροφυσικής των νεφών με δυνατότητες ρητής περιγραφής των μικροφυσικών διεργασιών, παραμετροποιημένα σχήματα μεταφοράς της μικρού και μεγάλου μήκους ακτινοβολίας, διάφορες επιλογές για τα πλευρικά και ανώτερα όρια όπως και διάφορα επίπεδα πολυπλοκότητας για την παραμετροποίηση του επιφανειακού στρώματος.

Το RAMS εφαρμόζεται συνήθως σαν μοντέλο περιορισμένης περιοχής. Δεν υπάρχει κατώτατο όριο για το μέγεθος της περιοχής ούτε για το πλέγμα πεπερασμένων διαφορών του μοντέλου. Με τον ίδιο κώδικα έχουν προσομοιωθεί φαινόμενα μικρής κλίμακας όπως ανεμοστρόβιλοι και στρόβιλοι στο οριακό στρώμα καθώς επίσης και μικρότερης κλίμακας τυρβώδεις ροές πάνω από κτίρια και αεροσύραγγες. Η εφαρμογή επάλληλων πλεγμάτων, που αλληλεπιδρούν αμφίδρομα, επιτρέπει την χρησιμοποίηση πλεγμάτων με υψηλή ανάλυση πάνω στις περιοχές του άμεσου ενδιαφέροντος με σκοπό την επίλυση μικρής κλίμακας ατμοσφαιρικών

Κεφάλαιο 2 ° : Περιγραφή των γενικών χαρακτηριστικών του αριθμητικού μοντέλου RAMS

συστημάτων, όπως τυφώνες, ενώ ταυτόχρονα επιλύει τα μεγάλης κλίμακας φαινόμενα στο πλέγμα χαμηλής ανάλυσης.

Οι κύριες συνιστώσες του RAMS είναι:

- Το ατμοσφαιρικό μοντέλο, που εκτελεί τις προσομοιώσεις,
- Το σύστημα εδάφους LEAF-3,
- Το σύστημα ανάλυσης δεδομένων (ISAN), το οποίο προετοιμάζει τα αρχικά δεδομένα από τις παρατηρήσεις για να χρησιμοποιηθούν από το ατμοσφαιρικό μοντέλο,
- Το σύστημα μετεπεξεργασίας (REU), το οποίο οπτικοποιεί και αναλύει τα αποτελέσματα του ατμοσφαιρικού μοντέλου με μια ποικιλία λογισμικού οπτικοποίησης και άλλα προγράμματα υποστήριξης.

Το ατμοσφαιρικό μοντέλο είναι κατασκευασμένο γύρω από το σύνολο των μή υδροστατικών συμπιεστών εξισώσεων της ατμοσφαιρικής δυναμικής και θερμοδυναμικής συν τις εξισώσεις διατήρησης βαθμωτών μεγεθών όπως οι αναλογίες μείγματος των υδρατμών και των υδρομετεώρων. Παρακάτω παρατίθενται αυτές οι εξισώσεις μαζί με την επεξήγηση των διαφόρων συμβόλων. Οι μεταβλητές των εξισώσεων, εκτός αυτών που δηλώνονται διαφορετικά, αφορούν τους μέσους όρους Reynolds των διαφόρων ατμοσφαιρικών μεγεθών και αντιπροσωπεύουν μέσες τιμές στον όγκο κάθε κυψελίδας του πλέγματος.

Εξισώσεις κίνησης:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi'}{\partial x} + f v + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi'}{\partial y} - f u + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -u \frac{\partial w}{\partial x} - v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi'}{\partial y} - \frac{g \theta'_v}{\theta_o} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

Κεφάλαιο 2 ° : Περιγραφή των γενικών χαρακτηριστικών του αριθμητικού μοντέλου RAMS

Θερμοδυναμικές εξισώσεις:

$$\frac{\partial \theta_{il}}{\partial t} = -u \frac{\partial \theta_{il}}{\partial x} - v \frac{\partial \theta_{il}}{\partial y} - w \frac{\partial \theta_{il}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial \theta_{il}}{\partial t} \right)_{rad}$$

Εξίσωση συνέχειας αναλογίας μίγματος υετού:

$$\frac{\partial r_n}{\partial t} = -u \frac{\partial r_n}{\partial x} - v \frac{\partial r_n}{\partial y} - w \frac{\partial r_n}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial r_n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial r_n}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial r_n}{\partial z} \right)$$

Εξίσωση συνέχειας μάζας:

$$\frac{\partial \pi'}{\partial t} = -\frac{R \pi_o}{c_v \rho_o \theta_o} \left(\frac{\partial \rho_o \theta_o u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_o \theta_o v}{\partial y} + \frac{\partial \rho_o \theta_o w}{\partial z} \right)$$

Πίνακας 3

Σύμβολα που αναφέρονται στις εξισώσεις

Σύμβολο	Ορισμός
u	Συνιστώσα του ανέμου στη διεύθυνση ανατολή-δύση
v	Συνιστώσα του ανέμου στη διεύθυνση βορράς-νότος
w	Κατακόρυφη συνιστώσα του ανέμου
f	Παραμετρος Coriolis
K_m	Συντελεστής τυρβώδους ροής για την ορμή
K_h	Συντελεστής τυρβώδους ροής για τη θερμότητα και την υγρασία
θ_{il}	Δυνητική θερμοκρασία νερού στερεάς-υγρής φάσης
r_n	Αναλογία μίγματος υετού (βροχής, κρυστάλλων, συσσωματωμάτων και χιονιού)
ρ	Πυκνότητα
rad	Δείκτης που δηλώνει τάση από την παραμετροποίηση της ακτινοβολίας
π	Ολική συνάρτηση Exner
π'	Συνάρτηση Exner διαταραχής
θ_v	Δυνητική θερμοκρασία

Κεφάλαιο 2 ° : Περιγραφή των γενικών χαρακτηριστικών του αριθμητικού μοντέλου RAMS

Αυτές οι εξισώσεις συμπληρώνονται με μια μεγάλη συλλογή παραμετροποιήσεων για την τυρβώδη διάχυση, το επιφανειακό οριακό στρώμα, το έδαφος, τη βλάστηση, την ηλιακή και γήινη ακτινοβολία, την κατακόρυφη μεταφορά, το σχηματισμό και τις αλληλεπιδράσεις των υγρών και στερεών υδρομετεώρων στα νέφη, την επίδραση της κίνησης του εδάφους, την κατακόρυφη ανάπτυξη των σωρειτών και την ανταλλαγή λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας μεταξύ ατμόσφαιρας και εδάφους το οποίο έχει αρκετά μεταβλητή σύσταση και ανάγλυφο.

Στην παραμετροποίηση της μικροφυσικής των νεφών στα μοντέλα καιρού, υπάρχουν δύο επιλογές για την αναπαράσταση της κατανομής μεγέθους των υδρομετεώρων. Η μία αφορά τον διαχωρισμό κάθε κατηγορίας υδρομετεώρων σε κλάσεις, η κάθε μία από τις οποίες αποτελεί μέρος του συνολικού φάσματος κατανομής των υδρομετεώρων (Bins models). Στη δεύτερη επιλογή η αναπαράσταση του μεγέθους των υδρομετεώρων για την κάθε κατηγορία γίνεται με μία συνάρτηση κατανομής η οποία μπορεί είτε να είναι μία εκθετική κατανομή είτε μία συνάρτηση γάμμα (Bulk- microphysical models). Η παραμετροποίηση της μικροφυσικής των νεφών στο μοντέλο RAMS ακολουθεί την δεύτερη επιλογή.

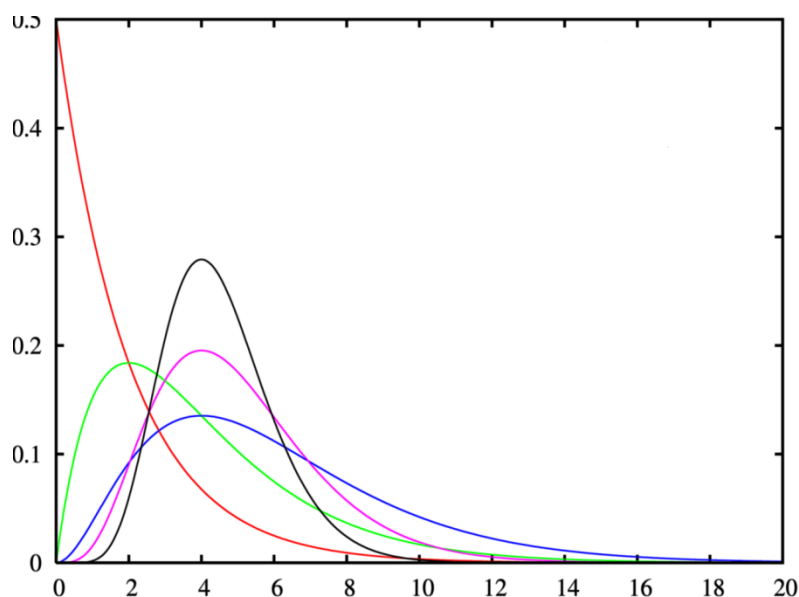
Συγκεκριμένα, κάθε κατηγορία υδρομετεώρων θεωρείται ότι ακολουθεί μία γενικευμένη γάμμα συνάρτηση όπως περιγράφηκε από τους Flatau et al. (1989) και τους Verlinde et al. (1990) και η οποία δίνεται από τη σχέση :

$$f_{gam}(D) = \frac{1}{\Gamma(v)} \left(\frac{D}{D_n}\right)^{v-1} \frac{1}{D_n} \exp\left(-\frac{D}{D_n}\right) \quad (1)$$

Όπου η διάμετρος D των υδρομετεώρων τρέχει από το μηδέν μέχρι το άπειρο, και $\Gamma(v)$ είναι σταθερά κανονικοποίησης ώστε το ολοκλήρωμα του f_{gam} ως προς D να ισούται με την μονάδα. Η παράμετρος v παίρνει πραγματικές τιμές μεγαλύτερες ή ίσες από τη μονάδα και είναι αυτή που ελέγχει την σχετική ποσότητα των μικρότερων υδρομετεώρων ως προς τη ποσότητα των μεγαλύτερων. Για την τιμή $v=1$ η μορφή της κατανομής είναι η μορφή της εκθετικής κατανομής ή της κατανομής Marshall-Palmer, ενώ όσο αυξάνεται το v η κατανομή παρουσιάζει εντονότερο μέγιστο (Σχήμα 1.14).

Κεφάλαιο 2 ° : Περιγραφή των γενικών χαρακτηριστικών του αριθμητικού μοντέλου RAMS

Ουσιαστικά, όταν αυξάνεται το ν για κάθε κατηγορία υδρομετεώρων αλλάζει η κατανομή τους σε σχέση με τη διάμετρό τους.



Σχήμα 2.1: Κατανομή Marshall-Palmer και κατανομή Γ. Κάθε καμπύλη έχει διαφορετικό ν (gamma shape parameter). Για την τιμή $\nu=1$ (κόκκινη γραμμή) η μορφή της κατανομής είναι η μορφή της εκθετικής κατανομής ή της κατανομής Marshall-Palmer, ενώ για $\nu>1$ παρουσιάζει μέγιστο, το οποίο όσο αυξάνεται το ν είναι εντονότερο και μετατοπισμένο δεξιότερα. Ο κατακόρυφος άξονας είναι οι τιμές της πυκνότητα πιθανότητας.

Τα μοντέλα της πρώτης κατηγορίας (Bins models) χωρίζουν το φάσμα κατανομής των υδρομετεώρων σε κλάσεις για κάθε μία από τις οποίες υπολογίζονται μία ή περισσότερες παράμετροι, κάνοντας την μέθοδο αυτή ακριβή σε υπολογιστικό χρόνο και μνήμη. Απ' την άλλη μεριά, τα μοντέλα της δεύτερης κατηγορίας (bulk microphysical models) επειδή παριστάνουν κάθε μέγεθος υδρομετεώρων με μία συνάρτηση, έχουν ως αποτέλεσμα τον προσδιορισμό περισσότερων διαγνωστικών παραμέτρων, εξοικονομώντας υπολογιστικό χρόνο και μνήμη.

Κεφάλαιο 2 ° : Περιγραφή των γενικών χαρακτηριστικών του αριθμητικού μοντέλου RAMS

Ακόμη, άλλο ένα πλεονέκτημα των μοντέλων που ακολουθούν την δεύτερη προσέγγιση είναι ότι έχουν την δυνατότητα βελτίωσης της ακρίβειά τους. Συγκεκριμένα τα προγενέστερα σχήματα υπολόγιζαν μία μόνο ροπή (one moment) της κατανομής (συνήθως την αναλογία μείγματος) και από αυτήν διαγνωστικά υπολόγιζαν τις υπόλοιπες. Στην νεότερη έκδοση αυτής της μεθόδου υπολογίζονται δύο ροπές (two moment) της κατανομής ,συνήθως η αναλογία μείγματος και η συγκέντρωση των υδρομετεώρων , και από αυτές γίνεται διάγνωση των υπόλοιπων. Ο υπολογισμός δύο ροπών της κατανομής δίνει περισσότερους βαθμούς ελευθερίας για κάθε κατηγορία υδρομετεώρων , βελτιώνοντας την πρόγνωση στις πολύπλοκες διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα για τον σχηματισμό βροχής.

Το μοντέλο RAMS στην παραμετροποίηση της μικροφυσικής των νεφών που χρησιμοποιεί, ακολουθεί την δεύτερη προσέγγιση (bulk microphysical model). Στο σχήμα το νερό μπορεί να πάρει οκτώ διαφορετικές μορφές. Συγκεκριμένα, υδρατμοί, νεφοσταγόνες, βροχή, παγοκρύσταλλοι, χιόνι, aggregates, graupel και χαλάζι το μέγεθος των οποίων ακολουθεί μια γενικευμένη Γάμμα κατανομή με παράμετρο το μέγιστό της, που ορίζεται από το χρήστη με βάση εμπειρικά δεδομένα. Οι νεφοσταγόνες και η βροχή είναι υδρομετέωρα που αποτελούνται από νερό σε υγρή κατάσταση, το οποίο όμως μπορεί να βρίσκεται και σε υπέρτηξη. Οι παγοκρύσταλλοι (pristine ice), το χιόνι και τα aggregates θεωρείται ότι βρίσκονται πλήρως σε στερεή φάση, ενώ το graupel και το χαλάζι είναι υδρομετέωρα τα οποία μπορεί να αποτελούνται από νερό που βρίσκεται μόνο σε στερεή φάση ή από ανάμεικτο νερό σε στερεή και υγρή φάση.

Οι νεφοσταγόνες (cloud droplets) είναι η μοναδική κατηγορία υδρομετεώρων που δεν αποτελεί κατακρημνίσμα. Δηλαδή, η ταχύτητα πτώσης της δεν είναι αρκετά ικανή ώστε να ξεπεράσει τα ανοδικά ρεύματα μέσα στο νέφος και τελικά να πέσει ως κατακρημνίσματα. Ακόμη, οι νεφοσταγόνες και οι παγοκρύσταλλοι (pristine ice) είναι οι κατηγορίες υδρομετεώρων που συμπυκνώνονται απευθείας από υδρατμούς. Οι υπόλοιπες κατηγορίες μετασχηματίζονται από ήδη υπάρχοντα υδρομετέωρα, ωστόσο άπαξ δημιουργηθούν μπορούν να μεγαλώσουν με απευθείας συμπύκνωση

Κεφάλαιο 2 ° : Περιγραφή των γενικών χαρακτηριστικών του αριθμητικού μοντέλου RAMS

υδρατμών στην επιφάνειά τους. Οι παγοκρύσταλλοι (pristine ice) μπορούν να μεγαλώσουν μόνο με συμπύκνωση και όχι με συλλογή. Ως παγοκρύσταλλοι (pristine ice) θεωρούνται οι παγοκρύσταλλοι που έχουν πολύ μικρό μέγεθος, ενώ παγοκρύσταλλοι μεγαλύτερου μεγέθους κατατάσσονται στην κατηγορία του χιονιού (snow). Ακριβέστερα ως χιόνι θεωρούνται οι μεγάλοι παγοκρύσταλλοι οι οποίοι έχουν μεγαλώσει με συμπύκνωση και rimming. Ως aggregates θεωρούνται τμήματα πάγου τα οποία έχουν μεγαλώσει από συλλογή παγοκρυστάλλων, χιονιού ή/και άλλων aggregates. Γενικά οι παγοκρύσταλλοι, το χιόνι, και τα aggregates είναι σωματίδια πάγου με χαμηλή πυκνότητα, που έχουν σχετικά μικρή μάζα και ταχύτητα κατακρήμνισης για το μέγεθός του. Τα graupels είναι υδρομετέωρα με ενδιάμεση πυκνότητα, με σφαιρικό σχήμα και δημιουργούνται είτε από ισχυρό rimming είτε από μερική τήξη των παγοκρυστάλλων (pristine ice), του χιονιού (snow) ή των aggregates. Τα graupel επιτρέπεται να περιέχουν ορισμένο ποσοστό νερού σε υγρή μορφή, εάν το ποσοστό ξεπεράσει το όριο, τότε τα επανακατηγοριοποιούνται σε χαλάζι (hail). Το χαλάζι (hail) είναι μία κατηγορία υδρομετεώρων με υψηλή πυκνότητα, σφαιρικό σχήμα το οποίο σχηματίζεται είτε από ψύξη των βροχοσταγόνων, είτε από rimming είτε από μερική τήξη των graupel. Το χαλάζι μπορεί να περιέχει οποιοδήποτε ποσοστό νερού σε υγρή μορφή αλλά όχι να βρίσκεται πλήρως (100%) σε υγρή μορφή, διότι τότε θεωρείται βροχή.

Οι διαφορές ανάμεσα στον προσδιορισμό της κατηγορίας graupel και hail εμπίπτουν περισσότερο στη διαφορά πυκνότητας και όχι τόσο στον τρόπο με τον οποίο σχηματίστηκαν. Η προσέγγιση αυτή εξυπηρετεί την ακριβέστερη μοντελοποίηση της ταχύτητας κατακρήμνισης των υδρομετεώρων αλλά και του ρυθμού σύγκρουσης και εξάτμισης των υδρομετεώρων που συνεπάγεται από αυτήν. Η ταχύτητα κατακρήμνισης είναι συνάρτηση της διαμέτρου και της κατηγορίας μόνο, με αποτέλεσμα η αλλαγή κατηγορίας να είναι το μέσο για την αλλαγή της ταχύτητας κατακρήμνισης.

Ακόμα ένας άλλος σκοπός που εξυπηρετείται από αυτήν την προσέγγιση είναι ότι όταν πραγματοποιείται η διαδικασία της επαναλαμβανόμενης ψύξης του υδρομετέωρου, τότε αυτή πρέπει να καταλήγει σε χαλάζι (hail).

Κεφάλαιο 2^ο : Περιγραφή των γενικών χαρακτηριστικών του αριθμητικού μοντέλου RAMS

Στο RAMS μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε αριθμός επάλληλων πλεγμάτων, ανάλογα φυσικά με τις διαθέσιμες υπολογιστικές δυνατότητες. Τα ένθετα πλέγματα (fine grids) μπορούν να εκτείνονται ως την κορυφή του εξωτερικού πλέγματος όπως και να μετατοπίζονται οριζόντια με τη ταχύτητα ενός εξεταζόμενου συστήματος (π.χ ενός τροπικού κυκλώνα ή μιάς καταιγίδας). Η ανάλυσή τους συνήθως είναι μεγαλύτερη του εξωτερικού και η επίλυση των εξισώσεων σε αυτά γίνεται με μικρότερο χρονικό βήμα. Για το λόγο αυτό εφαρμόζεται και μια γραμμική παρεμβολή στο χρόνο των τιμών του αραιότερου πλέγματος στα ενδιάμεσα χρονικά βήματα του ένθετου πλέγματος. Το ένθετο πλέγμα ενημερώνεται στη συνέχεια σε μια σειρά μικρότερων χρονικών βημάτων μέχρι να ολοκληρωθεί ο χρόνος προσομοίωσης του αραιότερου πλέγματος. Στο διάστημα αυτό υπολογίζεται ο μέσος όρος των προγνωστικών μεταβλητών για μια περιοχή κυψελίδων του ένθετου πλέγματος που αντιστοιχεί σε μια κυψελίδα του εξωτερικού. Με την τιμή που προκύπτει αντικαθίσταται η αντίστοιχη μεταβλητή στο αραιότερο πλέγμα και έτσι επιτυγχάνεται η αντίστροφη επικοινωνία μεταξύ δύο πλεγμάτων. Η επικοινωνία από το εξωτερικό προς το ένθετο πλέγμα ακολουθεί το χρονικό βήμα του εξωτερικού πλέγματος κατά το οποίο ενημερώνονται τα προγνωστικά πεδία. Οι ενημερωμένες μεταβλητές παρεμβάλλονται διαδοχικά στα όρια του ένθετου πλέγματος και οι τιμές στο ένθετο πλέγμα αντικαθίστονται από τις τιμές που προκύπτουν από την παρεμβολή.

Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι οι προγνωστικές συνιστώσες της ταχύτητας, της δυνητικής θερμοκρασίας και των μεταβλητών υγρασίας πολλαπλασιάζονται με την πυκνότητα πριν μεταφερθούν από το ένα πλέγμα στο άλλο. Οι τελεστές παρεμβολής και υπολογισμού μέσω όρων είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να αντιστρέφουν τα ολοκληρώματα όγκου των ποσοτήτων που προκύπτουν με τον τρόπο αυτό μεταξύ των πλεγμάτων. Αυτό συνεπάγεται τη διατήρηση της μάζας, της ορμής και της εσωτερικής θερμοδυναμικής ενέργειας κατά τη διαδικασία ορισμού των επάλληλων πλεγμάτων. Οι περισσότερες χωρικές παρεμβολές είναι δεύτερου βαθμού εκτός από μια διόρθωση για τη διατήρηση του ολοκληρώματος του όγκου.

Κεφάλαιο 2 ° : Περιγραφή των γενικών χαρακτηριστικών του αριθμητικού μοντέλου RAMS

Παρεμβολή τρίτου βαθμού εφαρμόζεται για τις συνιστώσες της ταχύτητας κατά τη διεύθυνση κάθε συνιστώσας. Κατ' αυτόν τον τρόπο ικανοποιείται ο περιορισμός για τη συνέχεια της μάζας.

Στο σύστημα LEAF-# (Land Ecosystem Atmosphere Feedback Model) περιλαμβάνεται η βλάστηση, το έδαφος, οι λίμνες και η ωκεανοί αλλά και τυχόν κάλυψη της επιφάνειας του εδάφους από χιόνι. Στα πλαίσια του μοντέλου λαμβάνεται υπόψη η αλληλεξάρτηση των παραπάνω χαρακτηριστικών αλλά και η αλληλεπίδρασή τους με την ατμόσφαιρα. Κάθε τύπος εδάφους αντιδρά και επηρεάζει το υπερκείμενο τμήμα της ατμόσφαιρας με το δικό του τρόπο. Η ατμοσφαιρική κυκλοφορία αρκετές φορές προκαλείται ή επηρεάζεται από την επιφάνεια του εδάφους (Avissar,1995). Το LEAF-3 δέχεται ως αρχικά δεδομένα συγκεκριμένα σετ δεδομένων χρήσης γης με σκοπό να προσδιορίσει τα κομμάτια και τις περιοχές του πλέγματος που καταλαμβάνουν, αλλά και να εξασφαλίσει βιοφυσικές παραμέτρους για τους διάφορους τύπους βλάστησης.

Το LEAF-3 περιλαμβάνει μία ομάδα εξισώσεων, οι οποίες αναπαριστούν την αποθήκευση και την ανταλλαγή θερμότητας και υγρασίας που συνδέονται με την αλληλεπίδραση της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας του εδάφους. Η βάση του είναι ένα θεμελιώδες μοντέλο, το οποίο περιλαμβάνει τις ακόλουθες φυσικές συνιστώσες:

- Έδαφος.
- Στιγμιαίο επιφανειακό νερό (π.χ. χιονοκάλυψη, λιωμένο χιόνι,βροχή).
- Βλάστηση.
- Μόνιμες υδάτινες επιφάνειες.
- Αέρα ανάμεσα στη βλάστηση (canopy air).
- Την ελεύθερη ατμόσφαιρα (το κατώτατο επίπεδο της).

Αναλυτικά με το LEAF-3 γίνεται αναπαράσταση του ισοζυγίου ενέργειας και υγρασίας για το έδαφος, για τη βλάστηση, για canopy air και για το νερό που συσσωρεύεται μόνιμα ή προσωρινά στην επιφάνεια του εδάφους. Γίνεται

Κεφάλαιο 2 ° : Περιγραφή των γενικών χαρακτηριστικών του αριθμητικού μοντέλου RAMS

επίσης αναπαράσταση και της ανταλλαγής ενέργειας και υγρασίας με την ατμόσφαιρα. Περιλαμβάνεται η επίδραση της θερμοκρασίας του εδάφους όταν αυτή είναι κάτω από 0°C (freezing soil), αλλά και πάνω από 0°C (throwing soil). Τέλος, η υδρολογική συνιστώσα του LEAF-3 αναπαριστά την οριζόντια ανακατανομή του νερού εξαιτίας των κλίσεων του εδάφους, που οδηγείται από τη δύναμη της βαρύτητας. Είναι καταλληλότερη για την εδαφική υγρασία σε βάθη από ένα έως δύο μέτρα, την υγρασία δηλαδή που τροφοδοτεί την ημερήσια εξατμισοδιαπνοή.

2.2. ICLAMS

Το Ατμοσφαιρικό μοντέλο ICLAMS (Integrated Community Limited Area Modeling System) αναπτύχθηκε από την ομάδα ατμοσφαιρικών μοντέλων και πρόγνωσης καιρού του πανεπιστημίου Αθηνών, με κύριο σκοπό τη μελέτη των αλληλεπιδράσεων των αιωρούμενων σωματιδίων με την ατμόσφαιρα. Η ανάπτυξη βασίστηκε στο ατμοσφαιρικό μοντέλο RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) (Pielke et al., 1992 ; Cotton et al., 2003).

Οι βασικές διαδικασίες που προστέθηκαν στις δυνατότητες του μοντέλου είναι οι εξής:

- Περιγραφή του κύκλου της σκόνης στην ατμόσφαιρα.
- Περιγραφή του κύκλου του αλατιού στην ατμόσφαιρα.
- Ατμοσφαιρική χημεία υγρής και αέριας φάσης.
- Ετερογενής χημεία και παραγωγή αιωρούμενων σωματιδίων μέχρι τρίτης γενιάς.
- Αναλυτική επίλυση της διαδικασίας διάδοσης της ακτινοβολίας.
- Αναλυτική επίλυση της διαδικασίας συμπύκνωσης των νεφοσταγόνων.

Το ατμοσφαιρικό μοντέλο Integrated Community Limited Area Modeling System -ICLAMS, έχει αναπτυχθεί από την Ομάδα Ατμοσφαιρικών Μοντέλων του Πανεπιστημίου Αθηνών στα πλαίσια του κοινοτικού έργου CIRCE,

Κεφάλαιο 2^ο : Περιγραφή των γενικών χαρακτηριστικών του αριθμητικού μοντέλου RAMS

έχοντας ως κύριο στόχο τη μελέτη των αλληλεπιδράσεων μεταξύ της αέριας ρύπανσης και των ατμοσφαιρικών διεργασιών και κατά συνέπεια τις πιθανές επιπτώσεις που μπορεί να επέλθουν στο κλίμα κάθε περιοχής. Το ICLAMS αποτελεί μια βελτιωμένη έκδοση του ατμοσφαιρικού μοντέλου RAMS6.0 (Cotton et al., 2003). Εκτός από τις ήδη υπάρχουσες δυνατότητες του RAMS το καινούργιο μοντέλο περιλαμβάνει λεπτομερές σχήμα ατμοσφαιρικής χημείας όπου όλες οι διαδικασίες αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον αναλύονται ταυτόχρονα (online coupled) με τις λοιπές μετεωρολογικές διεργασίες. Συγκεκριμένα παραμετροποιείται η διαδικασία παραγωγής μεταφοράς και εναπόθεσης σκόνης, αλατιού και ανθρωπογενών ρύπων, οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα τόσο στην αέρια όσο και στην υγρή φάση αλλά και η μετατροπή των αέριων ρύπων σε σωματίδια. Οι συγκεντρώσεις των διαφόρων τύπων αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα αποτελούν προγνωστικές μεταβλητές του μοντέλου και χρησιμοποιούνται τόσο στον προσδιορισμό των παραμέτρων για τη διάδοση της ακτινοβολίας (direct aerosol effect) όσο και στη διαδικασία σχηματισμού και εξέλιξης των νεφικών σχηματισμών (indirect aerosol effect).

Τα αιωρούμενα σωματίδια ενδέχεται πρωτογενώς να προέρχονται είτε από φυσικές πηγές (σκόνη από ερήμους, αλάτι, δασικές πυρκαγιές κλπ.) είτε από ανθρωπογενείς εκπομπές (βιομηχανίες, μεταφορές, θέρμανση κλπ.). Κατά τη μεταφορά τους όμως στην ατμόσφαιρα αλληλεπιδρούν μεταξύ τους (φωτοχημικές αντιδράσεις, ετερογενείς αντιδράσεις), αλλά και με το περιβάλλον σύμφωνα με αμφίδρομες και συχνά αρκετά περίπλοκες (Astitha and Kallos 2008). Ο άμεσος ρόλος που διαδραματίζουν τα σωματίδια της ατμόσφαιρας στη διάδοση της ακτινοβολίας έχει να κάνει με την επίδρασή τους στην απορρόφηση και σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορα μήκη κύματος ανάλογα με τις οπτικές τους ιδιότητες. Το σχήμα παραμετροποίησης της ακτινοβολίας στο ατμοσφαιρικό μοντέλο ICLAMS, είναι άμεσα συνδεδεμένο με την προγνωστική συγκέντρωση και σύσταση των διαφόρων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Το μοντέλο έχει τη δυνατότητα να αναπαράγει την επίδραση της αέριας ρύπανσης στη διάδοση τόσο της μικρού όσο και της μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας. Για τις φωτοχημικές

Κεφάλαιο 2 ° : Περιγραφή των γενικών χαρακτηριστικών του αριθμητικού μοντέλου RAMS

αντιδράσεις χρησιμοποιείται το εύρος του φάσματος που επηρεάζει το ρυθμό φωτόλυσης και καλείται ταυτόχρονα με το υπόλοιπο μετεωρολογικό μοντέλο.

Η διαδικασία συμπύκνωσης των νεφοσταγόνων συνδέεται επίσης άμεσα με τη σύσταση του ατμοσφαιρικού αέρα. Ανάλογα με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν (πίεση, θερμοκρασία και κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου) και το είδος των σωματιδίων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα (μέγεθος και χημική σύσταση) υπολογίζεται ο αριθμός των πυρήνων συμπύκνωσης που θα ενεργοποιηθούν για το σχηματισμό των νεφών (Fountoukis and Nenes 2005 ; Nenes and Seinfeld, 2003).

Οι φυσικοί ρύποι που λαμβάνονται υπόψη είναι η σκόνη της ερήμου ,το θαλάσσιο αλάτι και οι εκπομπές ισοπροπενίου από τις καλλιέργειες. Η περιγραφή των διεργασιών παραγωγής, μεταφοράς και εναπόθεσης της σκόνης της ερήμου στο ICLAMS, έγινε με την προσαρμογή της παραμετροποίησης που περιγράφει τις αντίστοιχες διαδικασίες στο ατμοσφαιρικό μοντέλο SKIRON (Spyrou et al., 2010). Στα πλαίσια του ατμοσφαιρικού μοντέλου ICLAMS, τα σωματίδια της σκόνης συμμετέχουν τόσο στις διαδικασίες διάδοσης της ακτινοβολίας (μικρού και μεγάλου μήκους κύματος) αλλά και στις διαδικασίες σχηματισμού των νεφών καθώς δρουν ως πυρήνες συμπύκνωσης και παγοποίησης. Ο κυρίαρχος μηχανισμός για την εισαγωγή σωματιδίων αλατιού στην ατμόσφαιρα είναι αυτός που περιγράφεται από τους Monahan et. al. (1986), Gong et al. (1997) και Zhang et al. (2005), κατά τον οποίο μέρος του αφρισμού που δημιουργείται στο πάνω μέρος ενός θαλάσσιου κύματος (whitecap) απομακρύνεται μέσω του ανέμου και με αυτό τον τρόπο τα σωματίδια του αλατιού εισέρχονται στην ατμόσφαιρα.

Στο κομμάτι του μοντέλου, που ασχολείται με τους ανθρωπογενείς ρύπους και γενικότερα με την ποιότητα του αέρα, λαμβάνονται υπόψη οι εκπομπές, οι φωτοχημικοί μηχανισμοί, οι φυσικές και χημικές διεργασίες . των ρύπων στη στερεά, υγρή και αέρια φάση και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ αερολυμάτων, ακτινοβολίας και νεφών. Τα CO_2 , CH_4 , N_2O , CO , NO_x , $NMVOG$, SO_2 , NH_3 , BC (*black carbon*) και OC (*organic carbon*).

όσον αφορά τη χημεία στο, το ICLAMS περιλαμβάνει σχήμα φωτοχημείας , χημεία εναέριας και υγρής φάσης, διεργασίες αερολυμάτων, καθώς και

Κεφάλαιο 2 ° : Περιγραφή των γενικών χαρακτηριστικών του αριθμητικού μοντέλου RAMS

μηχανισμούς διαφυγής, μαζί με αλληλεπιδράσεις αυτών των συνιστωσών. Η συνιστώσα της χημείας περιλαμβάνει 72 αέρια και 214 χημικές αντιδράσεις και λύνει το σύνολο των εξισώσεων για την κινηματική των αντιδράσεων και τη διατήρηση της μάζας κάθε στοιχείου. Από τις λύσεις προκύπτουν μεταβολές των συγκεντρώσεων των αερίων με το χρόνο και οι ρυθμοί αύξησης και ελάττωσης αυτών. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη του και την επίδραση στις συγκεντρώσεις αυτών των χημικών και φυσικών διεργασιών στα νέφη. Τέλος, στη χημεία των πολύ μικρών σωματιδίων που έχουν προέλθει από συμπυκνώσεις αερίων και διεργασίες συνένωσης, λαμβάνονται υπόψη τα θειικά αερολύματα, τα νιτρικά αερολύματα, το αμμώνιο, το νερό, ο οργανικός άνθρακας και στοιχειώδης άνθρακας, τα οποία συντίθενται από ύλη φυσικής (θαλάσσια σωματίδια, σκόνη) και ανθρωπογενούς προέλευσης (Kustha et al.2012).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο –Πειραματικό μέρος.

3.1. Επιλογή νεφικών συστημάτων ως δεδομένα εισόδου του μοντέλου.

Με σκοπό την επιλογή των κατάλληλων ατμοσφαιρικών συνθηκών για την προσομοίωση της σποράς, που αναλύεται στη συνέχεια της παρούσας εργασίας, το μοντέλο προσαρμόστηκε σε πεδίο δύο διαστάσεων (x-z) πάνω από επίπεδη επιφάνεια. Η οριζόντια διάσταση του μοντέλου έφτανε τα 24km με σημεία πλέγματος ανά 300 m, ενώ κατακόρυφα χρησιμοποιήθηκαν 35 επίπεδα με το πρώτο να είναι σε ύψος 100 m και το τελευταίο να φτάνει στα 18.000 m. Το βάθος των κατακόρυφων επιπέδων του αυξάνεται με λόγο $\frac{h_{z+1}}{h_z} = 1.1$. Οι ρυθμίσεις αυτές του μοντέλου παρέμειναν ίδιες σε όλες τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Ως αρχικές συνθήκες χρησιμοποιήθηκαν ομογενώς σε όλο το πεδίο επτά, διαφορετικές κάθε φορά, τυπικές ραδιοβολήσεις που αντιστοιχούν σε επτά διαφορετικές ενεργειακές καταστάσεις της ατμόσφαιρας. Κάθε προσομοίωση εκτελέστηκε με τα ίδια χαρακτηριστικά του μοντέλου. Κάθε προσομοίωση ξεκινούσε στις 1200 UTC και είχε διάρκεια έξι ώρες.

Και οι επτά νεφικοί σχηματισμοί δημιουργήθηκαν στα 10 λεπτά της προσομοίωσης και διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την ευστάθεια, το περιεχόμενό τους σε υγρασία. Παρακάτω περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των νεφικών σχηματισμών και η χωροχρονική τους εξέλιξη.

Cloud 1

Πρόκειται για ένα ασταθές νεφικό σύστημα μεικτής φάσης του οποίου η βάση είναι περίπου στα 1000 m και εκτείνεται σε ύψος περί τα 10.000 m, με CAPE 1949 J και με ελάχιστες θερμοκρασίες που φτάνουν περί τους -55°C . Αποτελείται από δύο μη διακριτές περιοχές. Η μία έχει την εικόνα νέφικου σχηματισμού κατακόρυφης ανάπτυξης, ενώ η άλλη στρωματόμορφου νέφους. Η αναλογία μείγματος φτάνει στη μέγιστη τιμή της $3.5 \frac{g}{kg}$ περί τα 20 λεπτά της προσομοίωσης. Ο υετός φτάνει στο έδαφος μετά τα 30 λεπτά και συνεχίζεται μέχρι περίπου 2 ώρες μετά την έναρξη της προσομοίωσης. Στη συνέχεια αρχίζει να διαλύεται (Σχήμα 3.1).

Cloud 2

Πρόκειται για ένα ασταθές νεφικό σύστημα μεικτής φάσης του οποίου η βάση είναι περίπου στα 1000 m και εκτείνεται σε ύψος περί τα 7000 m , με CAPE 1949 J και με ελάχιστες θερμοκρασίες που φτάνουν περί τους $-40^{\circ}C$. Έχει την εικόνα νέφικου σχηματισμού κατακόρυφης ανάπτυξης, εξαιτίας των έντονων ανοδικών ρευμάτων. Η αναλογία μείγματος φτάνει στη μέγιστη τιμή της $3.4 \frac{g}{kg}$ περί τα 20 λεπτά της προσομοίωσης. Ο υετός φτάνει στο έδαφος μετά τα 30 λεπτά και συνεχίζεται μέχρι περίπου 3 ώρες μετά την έναρξη της προσομοίωσης. Στη συνέχεια αρχίζει να διαλύεται (Σχήμα 3.2).

Cloud 3

Πρόκειται για ένα ασταθές νεφικό σύστημα μεικτής φάσης του οποίου η βάση είναι περίπου στα 1000 m και εκτείνεται σε ύψος περί τα 7000 m , με CAPE 1949 J και με ελάχιστες θερμοκρασίες που φτάνουν περί τους $-40^{\circ}C$. Έχει την εικόνα νέφικου σχηματισμού κατακόρυφης ανάπτυξης, εξαιτίας των έντονων ανοδικών ρευμάτων. Η αναλογία μείγματος φτάνει στη μέγιστη τιμή της $3.6 \frac{g}{kg}$ περί τα 20 λεπτά της προσομοίωσης. Ο υετός φτάνει στο έδαφος μετά τα 30 λεπτά και συνεχίζεται μέχρι περίπου 100 λεπτά μετά την έναρξη της προσομοίωσης. Στη συνέχεια αρχίζει να διαλύεται (Σχήμα 3.3).

Cloud 4

Πρόκειται για ένα ασταθές νεφικό σύστημα μεικτής φάσης του οποίου η βάση είναι περίπου στα 1000 m και εκτείνεται σε ύψος περί τα 10000 m , με CAPE 1949 J και με ελάχιστες θερμοκρασίες που φτάνουν περί τους $-55^{\circ}C$. Αποτελείται από δύο διακριτές περιοχές που απέχουν κατακόρυφα περίπου 1 km. Η αναλογία μείγματος φτάνει στη μέγιστη τιμή της $3 \frac{g}{kg}$ περί τα 20 λεπτά της προσομοίωσης. Ο υετός φτάνει στο έδαφος μετά τα 60 λεπτά και συνεχίζεται μέχρι περίπου 80 λεπτά μετά την έναρξη της προσομοίωσης. Στη συνέχεια αρχίζει να διαλύεται (Σχήμα 3.4).

Cloud 5

Πρόκειται για μία ασταθή κατάσταση της ατμόσφαιρας με CAPE 946J και μικρό περιεχόμενο υγρασίας που δίνει μικρούς νεφικούς σχηματισμούς με μικρή διάρκεια, που η βάση τους είναι τα 3000 m και με ελάχιστες θερμοκρασίες περί τους -20°C . Η αναλογία μείγματος παίρνει τη μέγιστη τιμή της $0.9 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$ 50 λεπτά μετά την έναρξη της προσομοίωσης (Σχήμα 3.5).

Cloud 6

Πρόκειται για ένα ασταθές νεφικό σύστημα μεικτής φάσης του οποίου η βάση είναι περίπου στα 1000 m και εκτείνεται σε ύψος περί τα 14.000 m, με CAPE 1641 J και με ελάχιστες θερμοκρασίες που φτάνουν περί τους -55°C . Η αναλογία μείγματος φτάνει στη μέγιστη τιμή της $4.1 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$ περί τα 20 λεπτά της προσομοίωσης. Ο υετός φτάνει κοντά στο έδαφος νωρίτερα σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις, περίπου στα 20 πρώτα λεπτά της προσομοίωσης και συνεχίζεται μέχρι περίπου τα 100 λεπτά. Στη συνέχεια αρχίζει να διαλύεται (Σχήμα 3.6).

Cloud 7

Πρόκειται για ένα ασταθές νεφικό σύστημα μεικτής φάσης του οποίου η βάση είναι περίπου στα 1000 m και εκτείνεται σε ύψος περί τα 7000 m, με CAPE 1949 J και με ελάχιστες θερμοκρασίες που φτάνουν περί τους -40°C . Έχει την εικόνα νέφικου σχηματισμού κατακόρυφης ανάπτυξης, εξαιτίας των έντονων ανοδικών ρευμάτων, χωρίς όμως να έχει την συμμετρία των προηγούμενων περιπτώσεων, εξ' αιτίας της ύπαρξης δυτικού ανέμου. Η αναλογία μείγματος φτάνει στη μέγιστη τιμή της $4.1 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$ περί τα 20 λεπτά της προσομοίωσης. Ο υετός φτάνει κοντά στο έδαφος νωρίτερα σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις, περίπου στα 20 πρώτα λεπτά της προσομοίωσης και συνεχίζεται μέχρι περίπου τα 100 λεπτά. Στη συνέχεια αρχίζει να διαλύεται (Σχήμα 3.7).

Για τον σκοπό της παρούσας εργασίας θα ήταν επιθυμητή η επιλογή μίας ασταθούς ατμόσφαιρας που οδηγεί σε νεφικό σύστημα μεικτής φάσης το

οποίο παράγει υετό με μεγάλη διάρκεια. Έτσι επιλέχθηκε η περίπτωση *cloud 2* με CAPE 1949 J, που οδηγεί στο νεφικό σχηματισμό με τη μεγαλύτερη αναλογία μείγματος ($3.4 \frac{g}{kg}$) και τη μεγαλύτερη διάρκεια (3 h). Στο εξής θα αναφέρεται ως «Νεφικός Σχηματισμός 1».

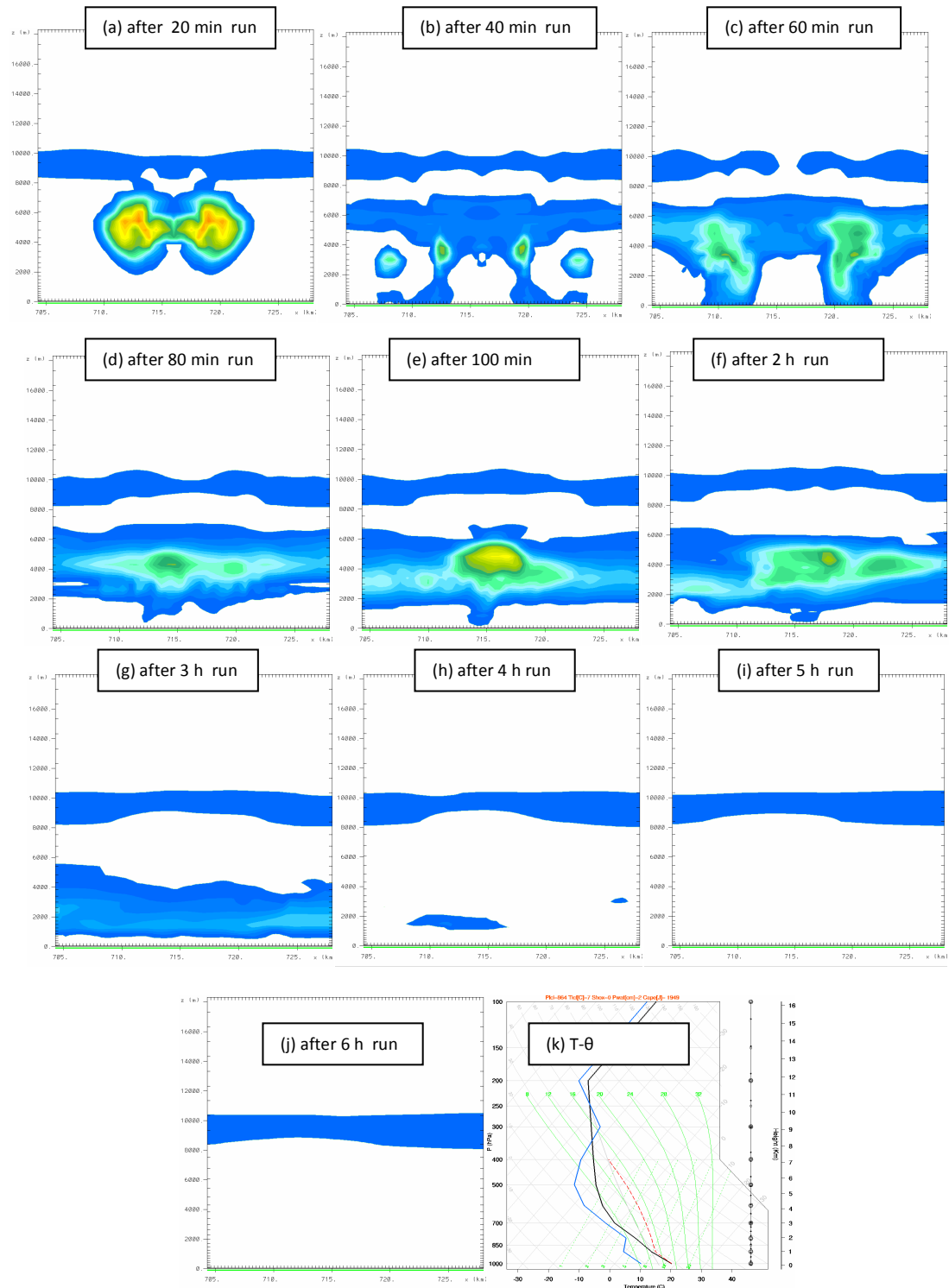
Για να διερευνηθούν και οι πιθανές επιδράσεις στην περίπτωση μίας ευσταθούς ατμόσφαιρας με χαμηλό περιεχόμενο σε υγρασία επιλέχθηκε και η περίπτωση *cloud 5* με CAPE 946 J και μέγιστη τιμή αναλογίας μείγματος $0.9 \frac{g}{kg}$, που στο εξής θα αναφέρετε ως «Νεφικός Σχηματισμός 2».

Πίνακας 4

Χαρακτηριστικά νεφικών συστημάτων

cloud	CAPE(J)	Ελάχιστη Θερμοκρασία (oC)	Αναλογία μείγματος($\frac{g}{kg}$)	Διάρκεια υετού (min)
1	1949	-55	3.5	60
2	1949	-40	3.4	180
3	1949	-40	3.6	100
4	1949	-55	3	80
5	941	-20	0.9	0
6	1949	-55	4.1	100
7	1949	-40	3.4	100

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος

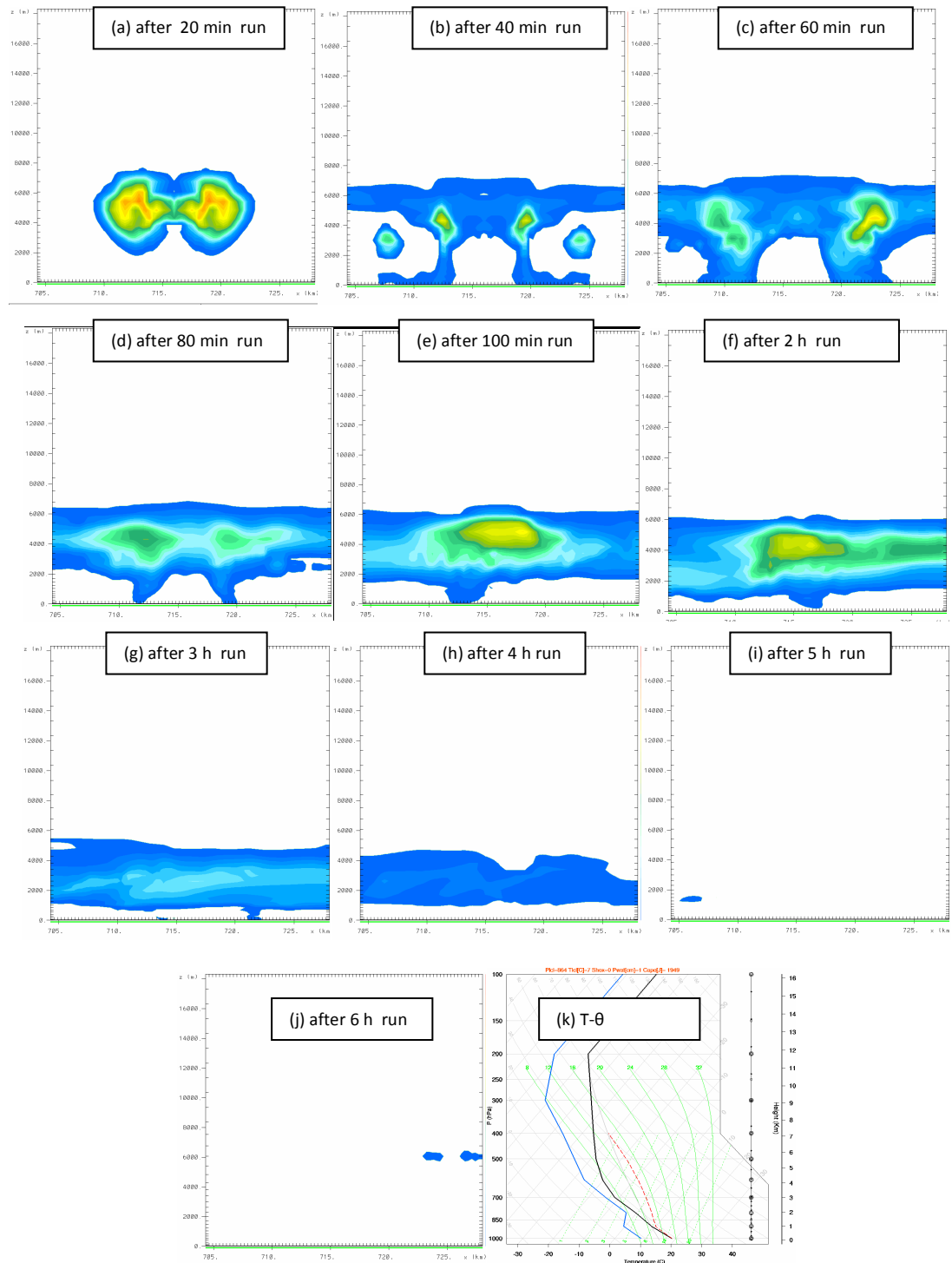


0.1 0.4 0.7 1.0 1.3 1.6 1.9 2.2 2.5 2.8 3.1 3.4 3.7 4.0 (g/kg)



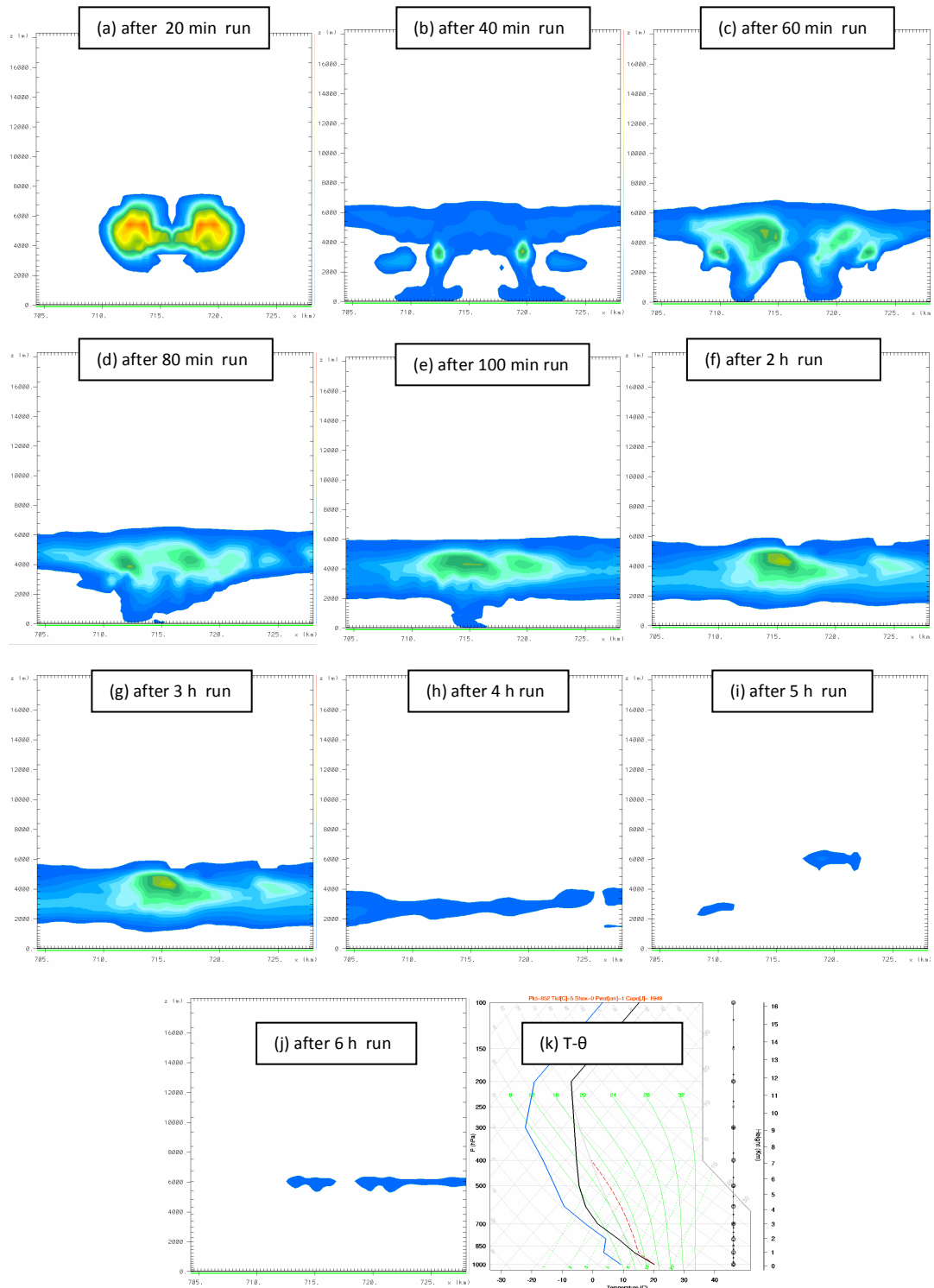
Σχήμα 3.1: cloud 1 τεφίγραμμα (k) της ραδιοβόλησης και η εξέλιξη των νεφικών συστημάτων που προκύπτουν (a,b,c,d,e,f,g,h,i,j). Κατακόρυφος άξονας είναι το ύψος στην ατμόσφαιρα σε m, οριζόντιος άξονας είναι η έκταση του domain σε km, η χρωματική κλίμακα είναι η ολική αναλογία μείγματος των υδρομετεώρων σε gkg^{-1} .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος



Σχήμα 3.2: cloud 2 τεφίγραμμα (k) της ραδιοβόλησης και η εξέλιξη των νεφικών συστημάτων που προκύπτουν (a,b,c,d,e,f,g,h,i,j). Κατακόρυφος άξονας είναι το ύψος στην ατμόσφαιρα σε m, οριζόντιος άξονας είναι η έκταση του domain σε km, η χρωματική κλίμακα είναι η ολική αναλογία μείγματος των υδρομετεώρων σε gkg^{-1} .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος

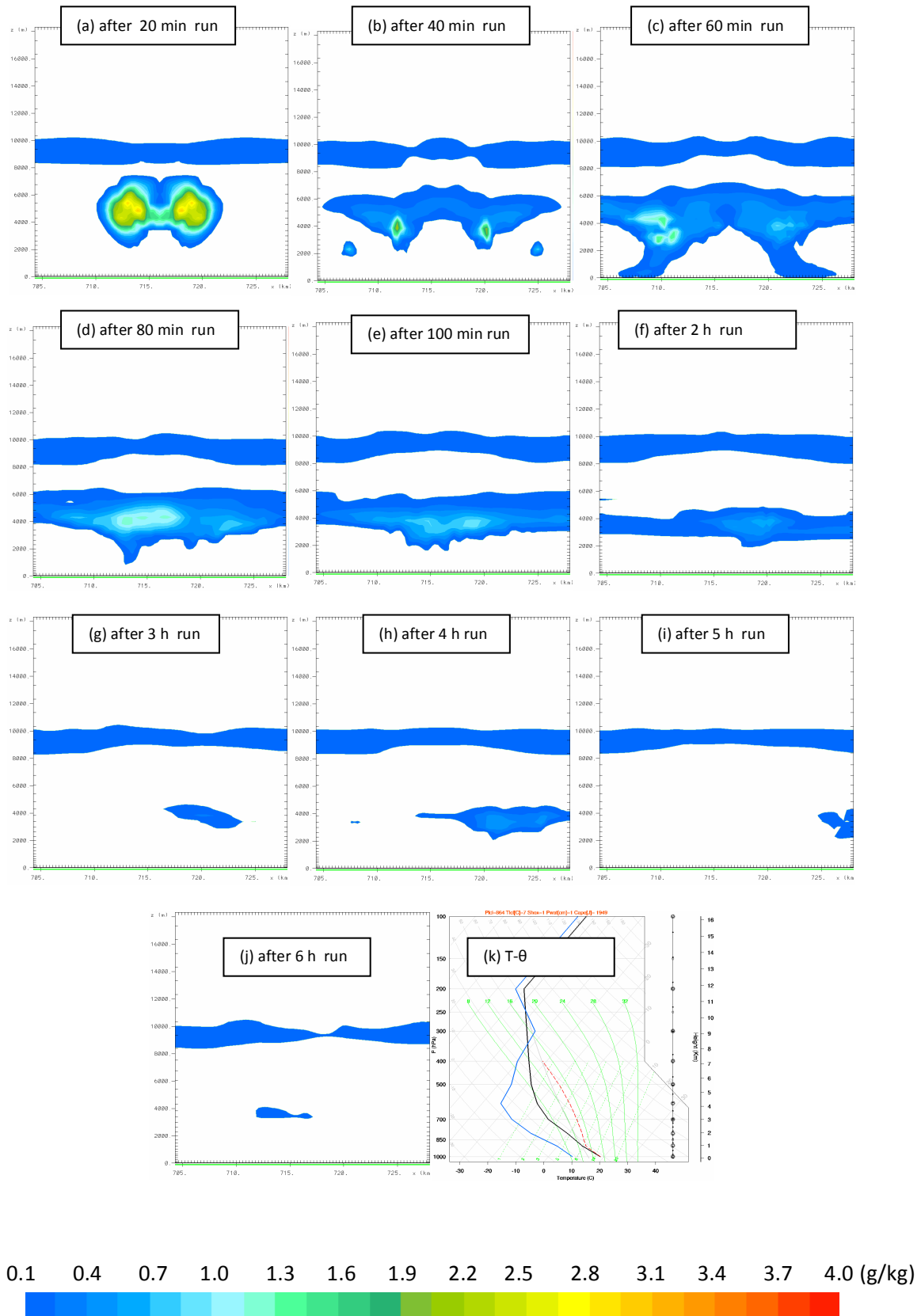


0.1 0.4 0.7 1.0 1.3 1.6 1.9 2.2 2.5 2.8 3.1 3.4 3.7 4.0 (g/kg)



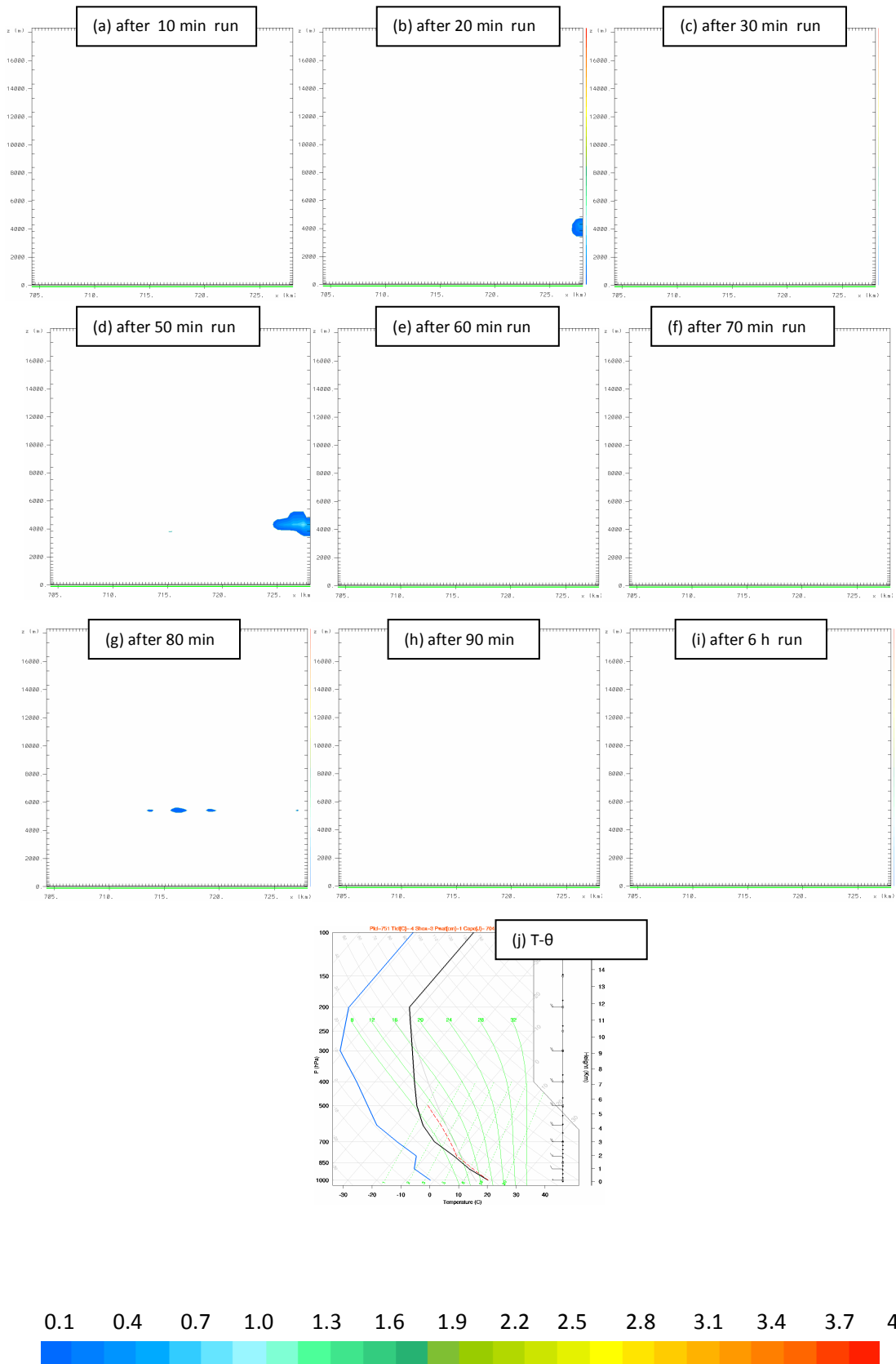
Σχήμα 3.3: cloud 3 τεφίγραμμα (k) της ραδιοβόλησης και η εξέλιξη των νεφικών συστημάτων που προκύπτουν (a,b,c,d,e,f,g,h,i,j). Κατακόρυφος άξονας είναι το ύψος στην ατμόσφαιρα σε m, οριζόντιος άξονας είναι η έκταση του domain σε km, η χρωματική κλίμακα είναι η ολική αναλογία μείγματος των υδρομετεώρων σε gkg^{-1} .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος



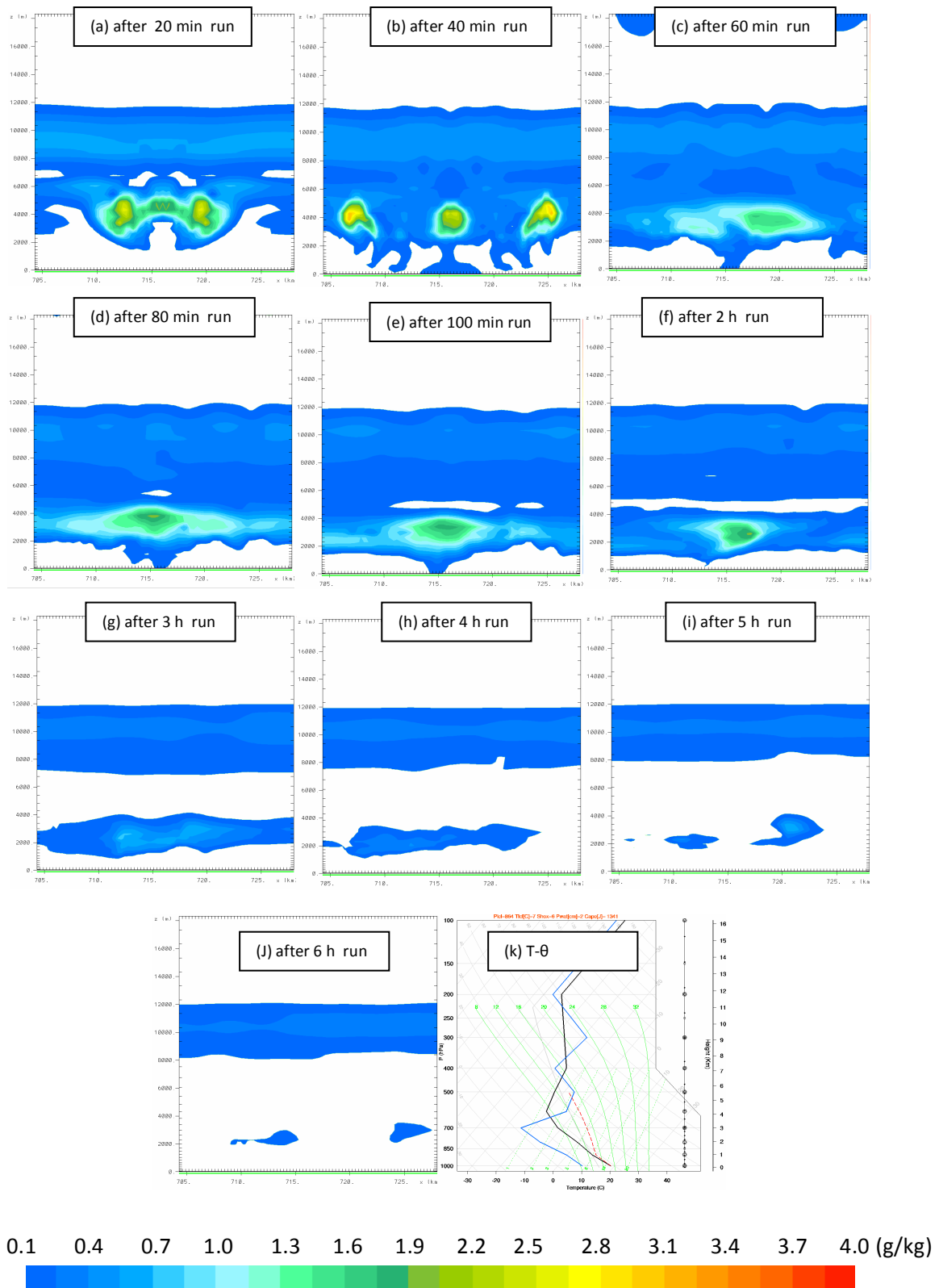
Σχήμα 3.4: cloud 4 τεφίγραμμα (k) της ραδιοβόλησης και η εξέλιξη των νεφικών συστημάτων που προκύπτουν (a,b,c,d,e,f,g,h,i,j). Κατακόρυφος άξονας είναι το ύψος στην ατμόσφαιρα σε m, οριζόντιος άξονας είναι η έκταση του domain σε km, η χρωματική κλίμακα είναι η ολική αναλογία μείγματος των υδρομετεώρων σε $g\,kg^{-1}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος



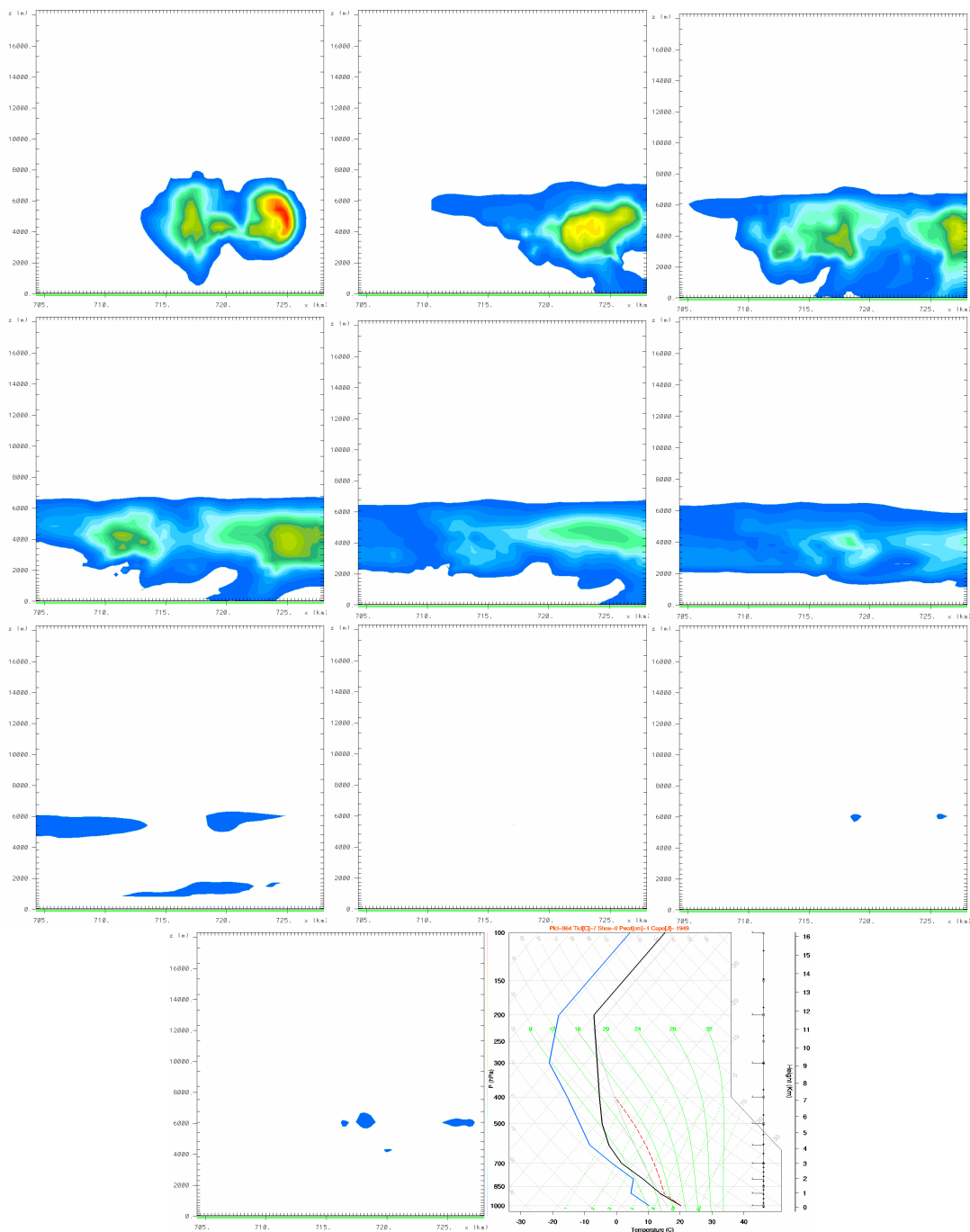
Σχήμα 3.5: cloud 5 τερίγραμμα (j) της ραδιοβόλησης και η εξέλιξη των νεφικών συστημάτων που προκύπτουν (a,b,c,d,e,f,g,h,i). Κατακόρυφος άξονας είναι το ύψος στην ατμόσφαιρα σε m, οριζόντιος άξονας είναι η έκταση του domain σε km, η χρωματική κλίμακα είναι η ολική αναλογία μείγματος των υδρομετεώρων σε gkg^{-1} .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος



Σχήμα 3.6: cloud 6 τεφίγραμμα (k) της ραδιοβόλησης και η εξέλιξη των νεφικών συστημάτων που προκύπτουν (a,b,c,d,e,f,g,h,i,j). Κατακόρυφος άξονας είναι το ύψος στην ατμόσφαιρα σε m, οριζόντιος άξονας είναι η έκταση του domain σε km, η χρωματική κλίμακα είναι η ολική αναλογία μείγματος των υδρομετεώρων σε gkg^{-1} .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος



Σχήμα 3.7: cloud 7 τεφίγραμμα (k) της ραδιοβόλησης και η εξέλιξη των νεφικών συστημάτων που προκύπτουν (a,b,c,d,e,f,g,h,i,j). Κατακόρυφος άξονας είναι το ύψος στην ατμόσφαιρα σε m, οριζόντιος άξονας είναι η έκταση του domain σε km, η χρωματική κλίμακα είναι η ολική αναλογία μείγματος των υδρομετεώρων σε $g \cdot kg^{-1}$.

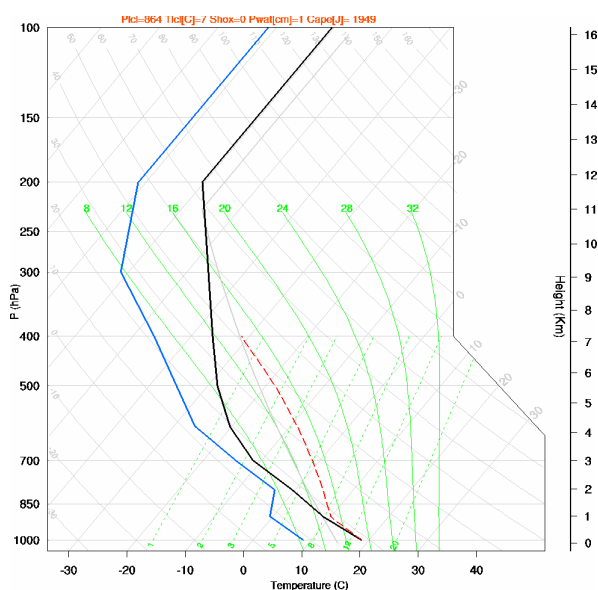
3.2. Έλεγχος ευαισθησίας για την επίδραση αιωρούμενων σωματιδίων στον συνολικό υετό.

Το μοντέλο RAMS στην παραμετροποίηση της μικροφυσικής των νεφών χρησιμοποιεί ένα bulk microphysical σχήμα που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Στο οποίο θεωρείται ότι η κατανομή του μεγέθους κάθε κατηγορίας υδρομετεώρων (water vapor, cloud droplets, rain, pristine ice, graupel, aggregates, hail, snow) ακολουθεί μία γάμμα κατανομή. Από την τιμή της παρμέτρου ν της γάμμα κατανομής (gamma shape parameter, *GNU*) εξαρτάται η μορφή της κατανομής. Η τιμή $\nu = 1$ αντιστοιχεί στην εκθετική κατανομή και καθώς το ν αυξάνεται η κατανομή έχει μέγιστο σε μεγαλύτερες τιμές της διαμέτρου των υδρομετεώρων και παρουσιάζει μικρότερη διασπορά. Ουσιαστικά, όταν αλλάζει η κατανομή των υδρομετεώρων, αλλάζει η αναλογία των υδρομετεώρων με διαφορετικά μεγέθη.

Το μέγεθος όμως των υδρομετεώρων μέσα στο νέφος, και ειδικότερα των νεφостаγόνων και των πρωτογενών παγοκρυστάλλων, παίζει σημαντικό ρόλο στις διαδικασίες συλλογής που λαμβάνουν χώρα σε ένα νεφικό σύστημα για τον σχηματισμό μεγαλύτερων υδρομετεώρων που μπορούν να φτάσουν στο έδαφος.

Με σκοπό να διερευνηθούν αυτές οι επιδράσεις στην μικροφυσική των νεφών, πραγματοποιήσαμε προσομοιώσεις ελέγχου ευαισθησίας στις οποίες αλλάζει η κατανομή των υδρομετεώρων. Δηλαδή, αλλάζει η παράμετρος ν της γάμμα κατανομής των υδρομετεώρων δύο κατηγοριών: cloud droplets και pristine ice. Οι τιμές της παραμέτρου ήταν $\nu = 1,2,3,5,7,9,11$ για την περίπτωση των cloud droplets και $\nu = 1,2,3,5$ για την περίπτωση των pristine ice.

Για τις αρχικές συνθήκες του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε η ραδιοβόληση που φαίνεται στο Σχήμα 2.8. και αντιστοιχεί στον «Νεφικό Σύστημα 1».



Σχήμα 3.8: Η ραδιοβόληση η οποία χρησιμοποιήθηκε ως οι αρχικές συνθήκες για τις προσομοιώσεις του μοντέλου (Νεφικό σύστημα 1).

Τα χαρακτηριστικά του νεφικού συστήματος μετά τις αλλαγές στο GNU φαίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 5 και Πίνακα 6. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι στην περίπτωση των cloud droplets η αύξηση του GNU οδηγεί σε αρχική μείωση της μέγιστης αναλογίας μείγματος και αύξηση της διάρκειας του υετού. Η εικόνα αυτή όμως αντιστρέφεται με περαιτέρω αύξηση του GNU. Παρόμοια εικόνα έχει και η επίδραση αλλαγής του GNU στην περίπτωση των pristine ice.

Πίνακας 5

Χαρακτηριστικά του «Νεφικού Σχηματισμού 1» μετά τις αλλαγές του *GNU* για την κατηγορία των cloud droplets

cloud droplets	Αναλογία μείγματος($\frac{g}{kg}$)	Διάρκεια υετού (min)
1	3.8	180
2	3.4	320
3	3.3	190
5	3.2	270
7	3.2	170
9	3.2	180
11	3.4	270

Πίνακας 6

Χαρακτηριστικά του «Νεφικού Σχηματισμού 1» μετά τις αλλαγές του *GNU* για την κατηγορία των pristine ice.

cloud droplets	Αναλογία μείγματος($\frac{g}{kg}$)	Διάρκεια υετού (min)
1	3.54	180
2	3.4	320
3	3.5	240
5	3.4	260

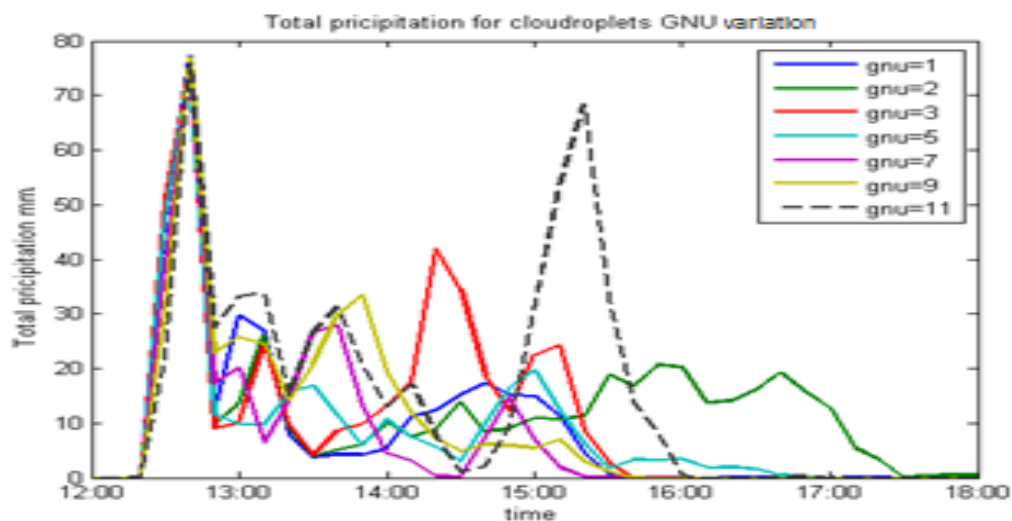
Στη συνέχεια έγινε μία στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab. Συγκρίθηκαν οι μέγιστες τιμές υετού και του συνολικού υετού για τις διάφορες τιμές *GNU*.

Φαίνεται ότι ο αθροιστικός υετός στην περίπτωση των cloud droplets αυξάνεται για $GNU = 2$ και η διάρκεια του υετού είναι μεγαλύτερη (Σχήμα 3.12β). Στη συνέχεια μειώνεται περισσότερο η διάρκεια του υετού, ωστόσο αυξάνεται η έντασή του τις πρώτες ώρες της προσομοίωσης (Σχήμα 3.12γ,δ,ε,ζ). Τα αποτελέσματα αυτά οφείλονται στο φαινόμενο κατά το οποίο όταν αυξηθεί η διάμετρος της υδροσταγόνας, τότε ενισχύεται η αύξησή της με την διαδικασία της συλλογής και κατ' επέκτασιν αυξάνονται και τα ποσά υετού. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται όταν η ακτίνα της υδροσταγόνας είναι μεγαλύτερη ή ίση με 20μm.

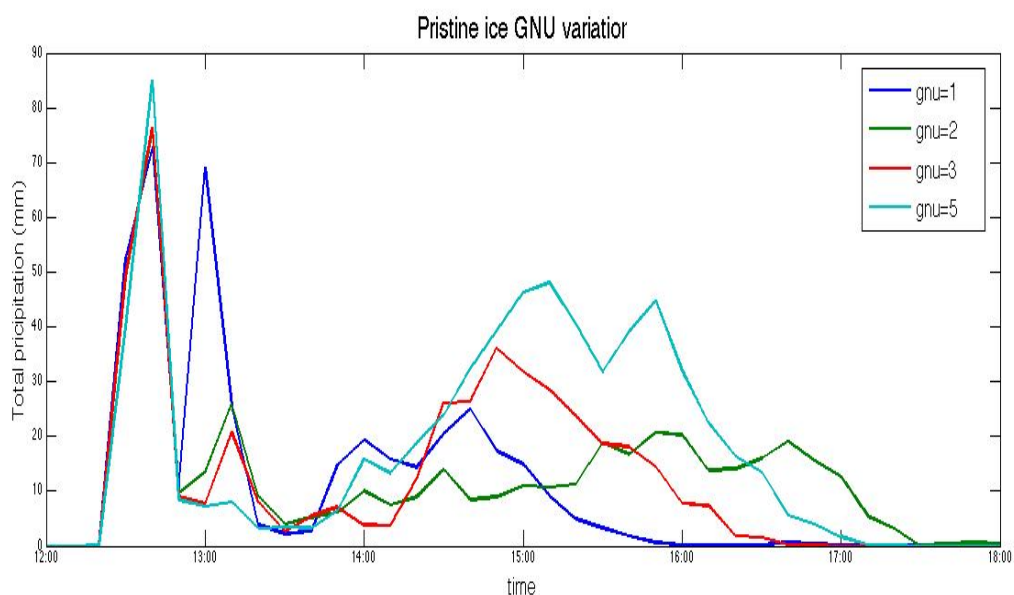
Στην περίπτωση των pristine ice, φαίνεται η αύξηση της βροχόπτωσης για $GNU=2$ Σχήμα (3.14β) και η μείωση της διάρκειας αλλά η εμφάνιση όλο και εντονότερου δευτερεύοντος μεγίστου με περαιτέρω αύξηση του GNU (Σχήμα 3.12γ,δ,ε). Πιο έντονο είναι το δευτερεύον μέγιστο για $GNU=5$ (Σχήμα 3.9). Η παρατήρηση αυτή οφείλεται πιθανότατα στην διαδικασία Wegener–Bergeron–Findeisen, κατά την οποία επειδή, στην ίδια θερμοκρασία, η τάση των κορεσμένων υδρατμών ως προς το νερό είναι μεγαλύτερη από την τάση των κορεσμένων υδρατμών ως προς τον πάγο $\frac{e_{sw}}{e_i} > 1$, η συνύπαρξη παγοκρυστάλλων και σταγόνων σε υπέρτηξη να οδηγεί στην εξάτμιση των σταγόνων και στην μεταφορά των υδρατμών προς αύξηση των παγοκρυστάλλων, που στην πορεία μεγαλώνουν και κατακρημνίζονται αφού περάσουν στην υγρή κατάσταση καθώς περνούν από υψηλότερες θερμοκρασίες.

Και για τα δύο είδη υδρομετεώρων οι τιμές $GNU = 2$ και $GNU = 5$ εμφανίζουν τον μέγιστο συνολικό υετό και με την μεγαλύτερη διάρκεια. Από τη βιβλιογραφία οι δύο αυτές τιμές φαίνεται να περιγράφουν καλύτερα τις κατανομές του μεγέθους των υδρομετεώρων. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε η τιμή $GNU = 2$ για τις προσομοιώσεις σποράς που πραγματοποιήθηκαν στη συνέχεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος

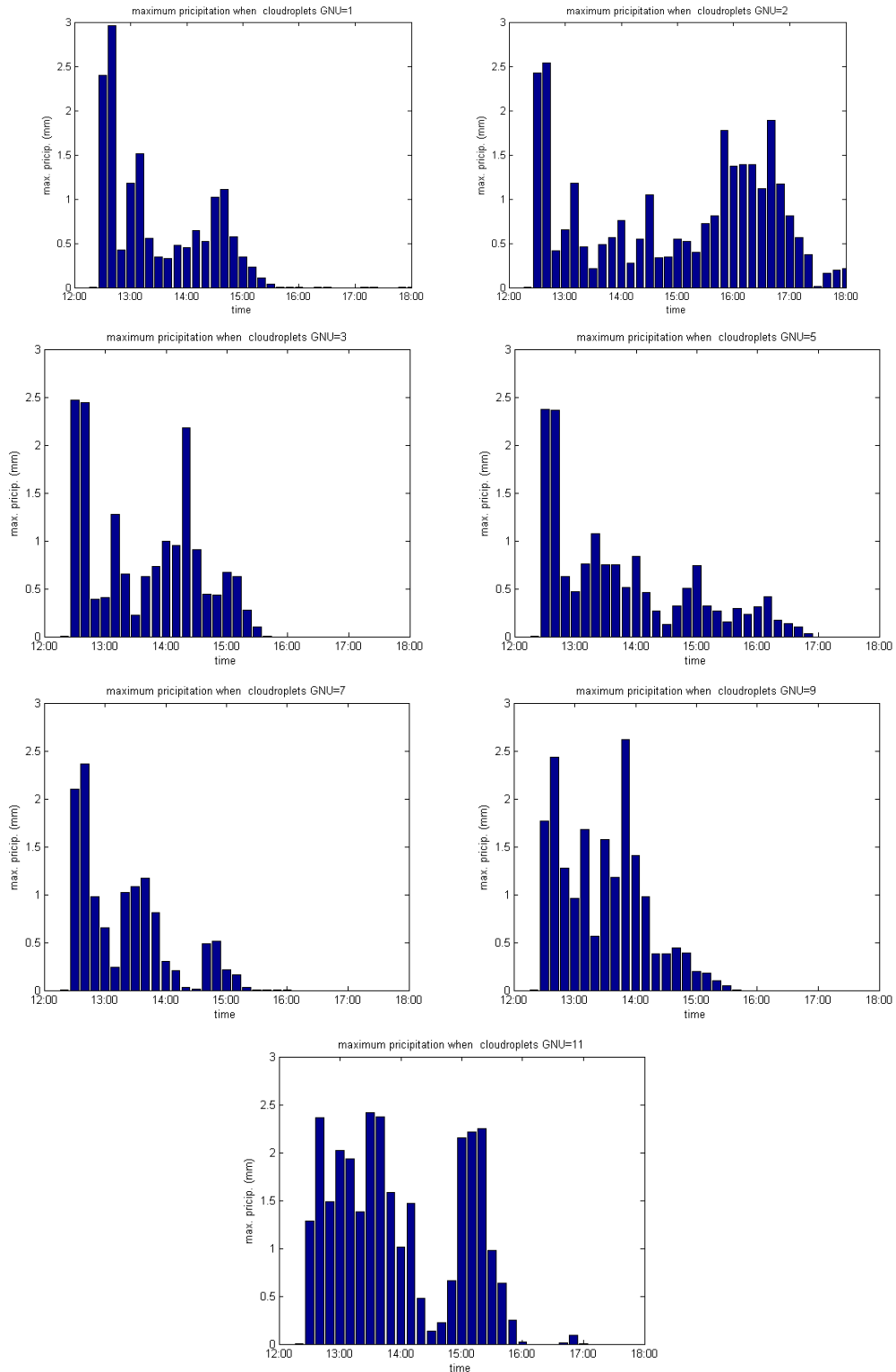


Σχήμα 3.9: Ο συνολικός υετός για τις διάφορες τιμές της γ shape parameter (GNU) των *cloud droplets* συναρτήσει του χρόνου. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται ο χρόνος και στον κατακόρυφο ο συνολικός υετός σε mm.



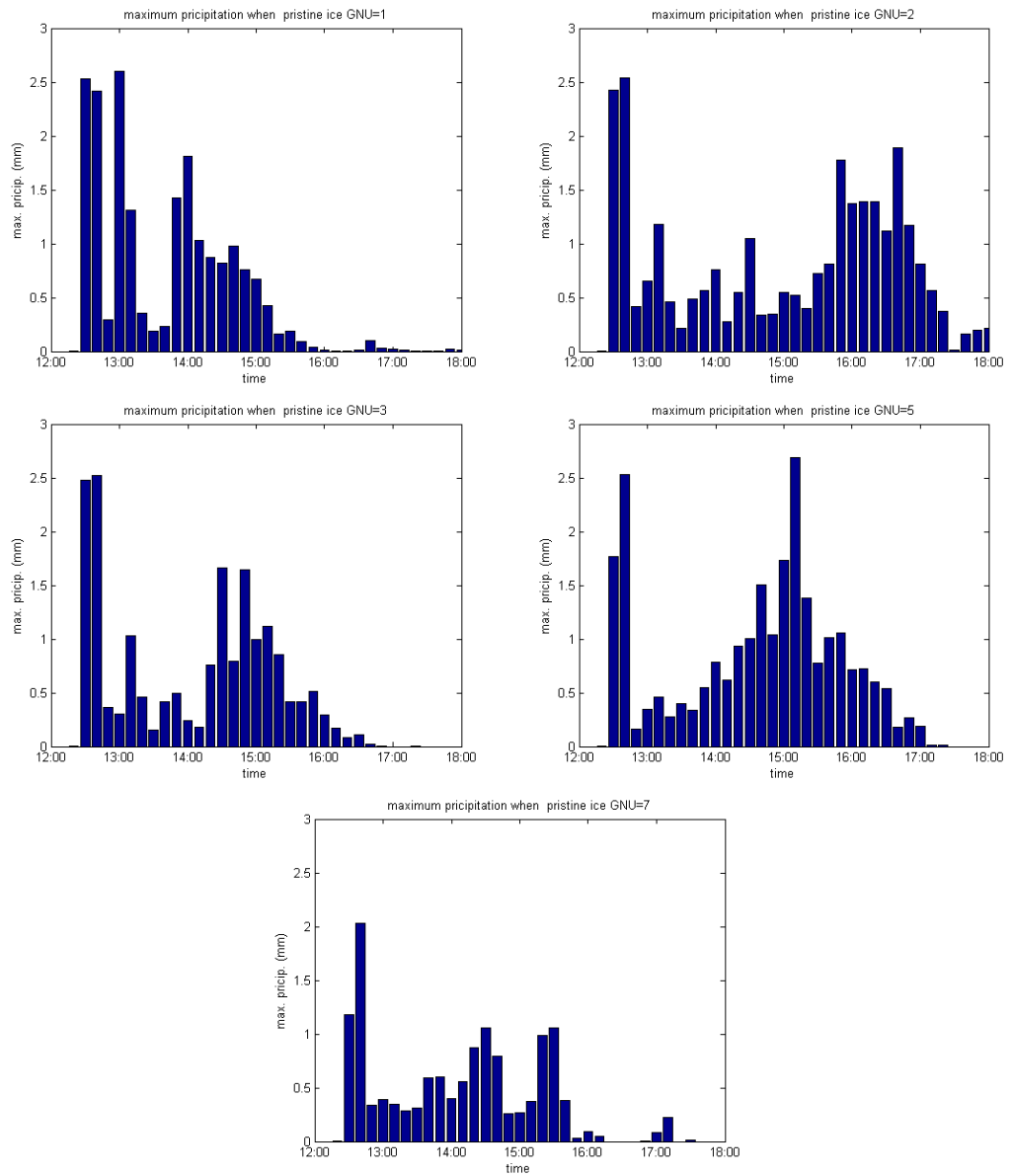
Σχήμα 3.10: Ο συνολικός υετός για τις διάφορες τιμές της γ shape parameter (GNU) των *pristine ice* συναρτήσει του χρόνου. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται ο χρόνος και στον κατακόρυφο ο συνολικός υετός σε mm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος



Σχήμα 3.11: μέγιστες τιμές βροχόπτωσης συναρτήσει του χρόνου για τις διάφορες τιμές της gamma shape parameter (GNU) των cloud droplets. (α) GNU=1 (β) GNU=2 (γ) GNU=3 (δ) GNU=5 (ε) GNU=7 (στ) GNU=9 (ζ) GNU=11 .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος



Σχήμα 3.12: μέγιστες τιμές βροχόπτωσης συναρτήσει του χρόνου για τις διάφορες τιμές της gamma shape parameter (GNU) των pristine ice. (α) GNU=1 (β) GNU =2 (γ) GNU =3 (δ) GNU =5 (ε).

3.3. Προσομοιώσεις τροποποίησης καιρού.

Στη συνέχεια περιγράφεται η προσπάθεια προσομοίωσης τροποποίησης καιρού με την μέθοδο της εναέριας σποράς νέφους με αεροσκάφος, που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Στην προσπάθεια αυτή και στα πλαίσια του ατμοσφαιρικού μοντέλου RAMS/ICLAMS (Solomos et al.,2011 ; Kushta et al.,2013), αναπτύχθηκαν κατάλληλοι αλγόριθμοι από την Ομάδα Ατμοσφαιρικών Μοντέλων του Πανεπιστημίου Αθηνών για την περιγραφή της απελευθέρωσης πυρήνων συμπύκνωσης (CCN) και παγοποίησης (IN) σε διάφορα ύψη μέσα σε ένα νεφικό σύστημα. Τα σχήματα ενεργοποίησης CCN και IN είναι τα Fountoukis, C. and A. Nenes, A.,(2005) και Barahona, D. and Nenes, A. (2007). Το αεροπλάνο θεωρείται ότι έχει ταχύτητα περίπου $280 \frac{m}{s}$ και η σπορά γίνεται σε ένα στρώμα βάθους $1000 m$ περίπου ώστε να προσομοιωθούν όσο το δυνατόν καλύτερα οι πραγματικές συνθήκες σποράς.

Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, αφορούν την σπορά με δύο διαφορετικά υλικά, σε δύο ύψη μέσα στην ατμόσφαιρα, σε δύο νεφικά συστήματα (Νεφικό σύστημα 1, Νεφικό σύστημα 2, Σχήμα 3.13 και 3.14). Τα δύο ύψη αντιστοιχούν, προσεγγιστικά, στη βάση και στο μέσο ύψος του νέφους και η σπορά σε αυτά τα δύο νέφη έχει σκοπό να μελετηθεί η συμπεριφορά των εκπεμπόμενων σωματιδίων σε διαφορετικές θερμοκρασίες, αλλά και υπό την επίδραση διαφορετικών ρευμάτων που υπάρχουν μέσα στο νέφος.

Για την αποσαφήνιση των πολύπλοκων φυσικών μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα μέσα στο νέφος κατά τον σχηματισμό υετού, οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι δύο διαστάσεων, πάνω από επίπεδη επιφάνεια ώστε να μην επηρεαστούν τα αποτελέσματα από παράγοντες όπως η τοπογραφία ή η γεινίαση με άλλες περιοχές και να απομονωθούν μόνο οι μικροφυσικοί μηχανισμοί που είναι υπεύθυνοι για την παραγωγή υετού.

Πιο συγκεκριμένα, τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι, ο ιωδιούχος άργυρος (AgI) και το χλωριούχο νάτριο (NaCl). Το πρώτο υλικό, λόγω της

μοριακής του δομής, δρά ως πυρήνας παγοποίησης (IN), ενώ το δεύτερο λειτουργεί ως πυρήνας συμπύκνωσης (CCN).

Πιο αναλυτικά, πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις για 11 διαφορετικά σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7

Τα 11 διαφορετικά σενάρια αριθμητικών προσομοιώσεων τροποποίησης καιρού

	NaCl	ΣΕΝΑΡΙΟ 1	Σπορά χλωριούχου νατρίου σε ύψος 3000 m με ρυθμό εκπομπής $2.5 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$. Σχήμα 3.14.
	NaCl	ΣΕΝΑΡΙΟ 2	Σπορά NaCl σε ύψος 3000 m με ρυθμό εκπομπής $25 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ Σχήμα 3.15.
	NaCl	ΣΕΝΑΡΙΟ 3	Σπορά NaCl σε ύψος 3000 m με ρυθμό εκπομπής $250 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$. Σχήμα 3.16.
Νεφικό Σύστημα 1	NaCl	ΣΕΝΑΡΙΟ 4	Σπορά NaCl σε ύψος 1000 m με ρυθμό εκπομπής $2.5 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$. Σχήμα 3.17.
	NaCl	ΣΕΝΑΡΙΟ 5	Σπορά NaCl σε ύψος 1000 m με ρυθμό εκπομπής $25 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$. Σχήμα 3.18.
	NaCl	ΣΕΝΑΡΙΟ 6	Σπορά NaCl σε ύψος 1000 m με ρυθμό εκπομπής $250 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$. Σχήμα 3.19.
	AgI	ΣΕΝΑΡΙΟ 7	Σπορά AgI σε ύψος 3000 m με ρυθμό εκπομπής $2.5 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$. Σχήμα 3.20.
	AgI	ΣΕΝΑΡΙΟ 8	Σπορά AgI σε ύψος 3000 m με ρυθμό εκπομπής $2.5 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ Σχήμα 3.21.
	AgI	ΣΕΝΑΡΙΟ 9	Σπορά AgI σε ύψος 3000 m με ρυθμό εκπομπής $25 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ Σχήμα 3.22.
	AgI	ΣΕΝΑΡΙΟ 10	Σπορά AgI σε ύψος 1000 m με ρυθμό εκπομπής $250 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$. Σχήμα 3.23.
Νεφικό Σύστημα 2	AgI	ΣΕΝΑΡΙΟ 11	Σπορά AgI σε ύψος 1000 m με ρυθμό εκπομπής $250 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$. Σχήμα 3.24.

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται οι νεφικοί σχηματισμοί που προκύπτουν για κάθε ένα από τα 11 παραπάνω σενάρια. Στον κατακόρυφο άξονα παριστάνεται το ύψος στην ατμόσφαιρα σε m , στον οριζόντιο άξονα η έκταση του domain σε km , η χρωματική κλίμακα είναι η ολική αναλογία μείγματος των υδρομετεώρων σε $grkg^{-1}$, με μαύρα βέλη φαίνεται η ένταση και η κατεύθυνση του ανέμου. Τέλος, με κόκκινες ισοπληθείς είναι η συγκέντρωση των σωματιδίων σποράς σε $grcm^{-3}$.

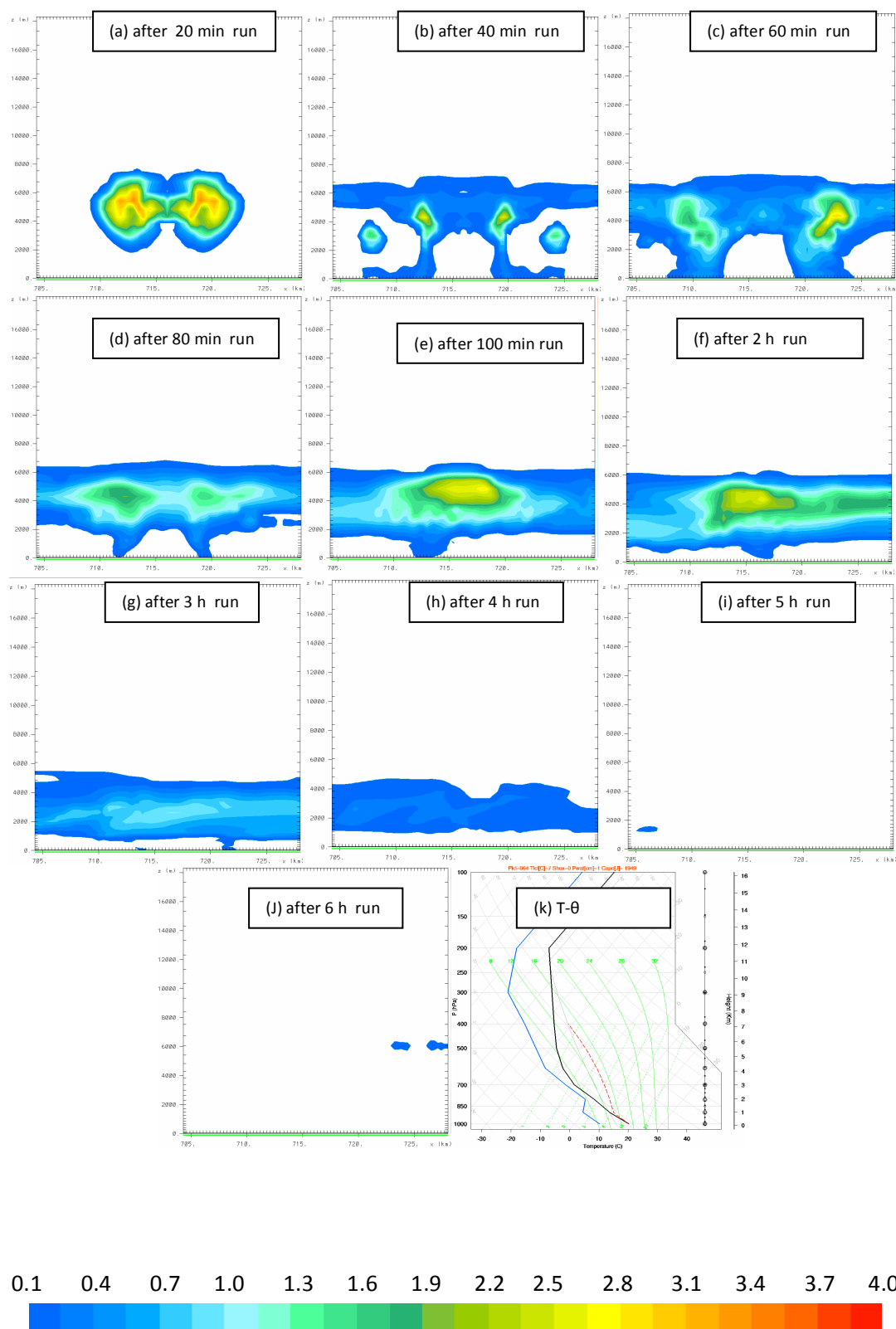
Σε όλες τις περιπτώσεις η απόκριση του νεφικού συστήματος είναι μετά τα 40 λεπτά της προσομοίωσης, καθώς υπερισχύουν τα δυναμικά του χαρακτηριστικά.

Στα σχήματα 3.15-3.16-3.17 φαίνεται η εξέλιξη των νεφικών σχηματισμών που προκύπτουν όταν γίνεται σπορά στο Νεφικό σύστημα 1 με χλωριούχο νάτριο ($NaCl$) στα $3000m$, με ρυθμούς εκπομπής $2.5\#cm^{-3}s^{-1}$, $25\#cm^{-3}s^{-1}$, $250\#cm^{-3}s^{-1}$ αντίστοιχα. Στα σχήματα 3.18-3.19-3.20 φαίνονται οι αντίστοιχοι σχηματισμοί όταν η ίδια σπορά γίνεται στο ύψος των $1000 m$. Η σπορά στα $3000 m$, ουσιαστικά αντιστοιχεί σε σπορά μέσα στο νέφος, ενώ η σπορά στα $1000m$, σε σπορά κάτω από το νέφος. Τα ανοδικά και καθοδικά ρεύματα ανέμου που κυριαρχούν μέσα αλλά και κάτω από το νέφος, έχουν σαν αποτέλεσμα την καλύτερη διάχυση των σωματιδίων σποράς όταν η σπορά γίνεται μέσα στο νέφος ($3000 m$), ωστόσο παρατηρούνται μικροδιαφορές της τάξεως του εκατοστού στις μέγιστες τιμές αναλογίας μείγματος μεταξύ των περιπτώσεων σποράς και της κατάστασης χωρίς σπορά.

Στα σχήματα 3.21-3.22-3.23 φαίνονται οι νεφικοί σχηματισμοί που προκύπτουν όταν γίνεται σπορά στο νέφος με ιωδιούχο άργυρο (AgI) στα $3000m$ με ρυθμούς εκπομπής $2.5\#cm^{-3}s^{-1}$, $25\#cm^{-3}s^{-1}$, $250\#cm^{-3}s^{-1}$ αντίστοιχα, ενώ στο σχήμα 3.24 φαίνεται ο νεφικός σχηματισμός που προκύπτει όταν η σπορά με ιωδιούχο άργυρο (AgI) γίνεται στα $1000m$ με ρυθμό εκπομπής $250\#/cm^3s$. Τα αποτελέσματα της σποράς με ιωδιούχο άργυρο (AgI) παρουσιάζουν παρόμοια εικόνα με αυτά του χλωριούχου νατρίου ($NaCl$) ως προς την διάχυση των σωματιδίων και την αναλογία μείγματος. Στο ύψος των $3000m$ επιτυγχάνεται καλύτερη ανάμειξη.

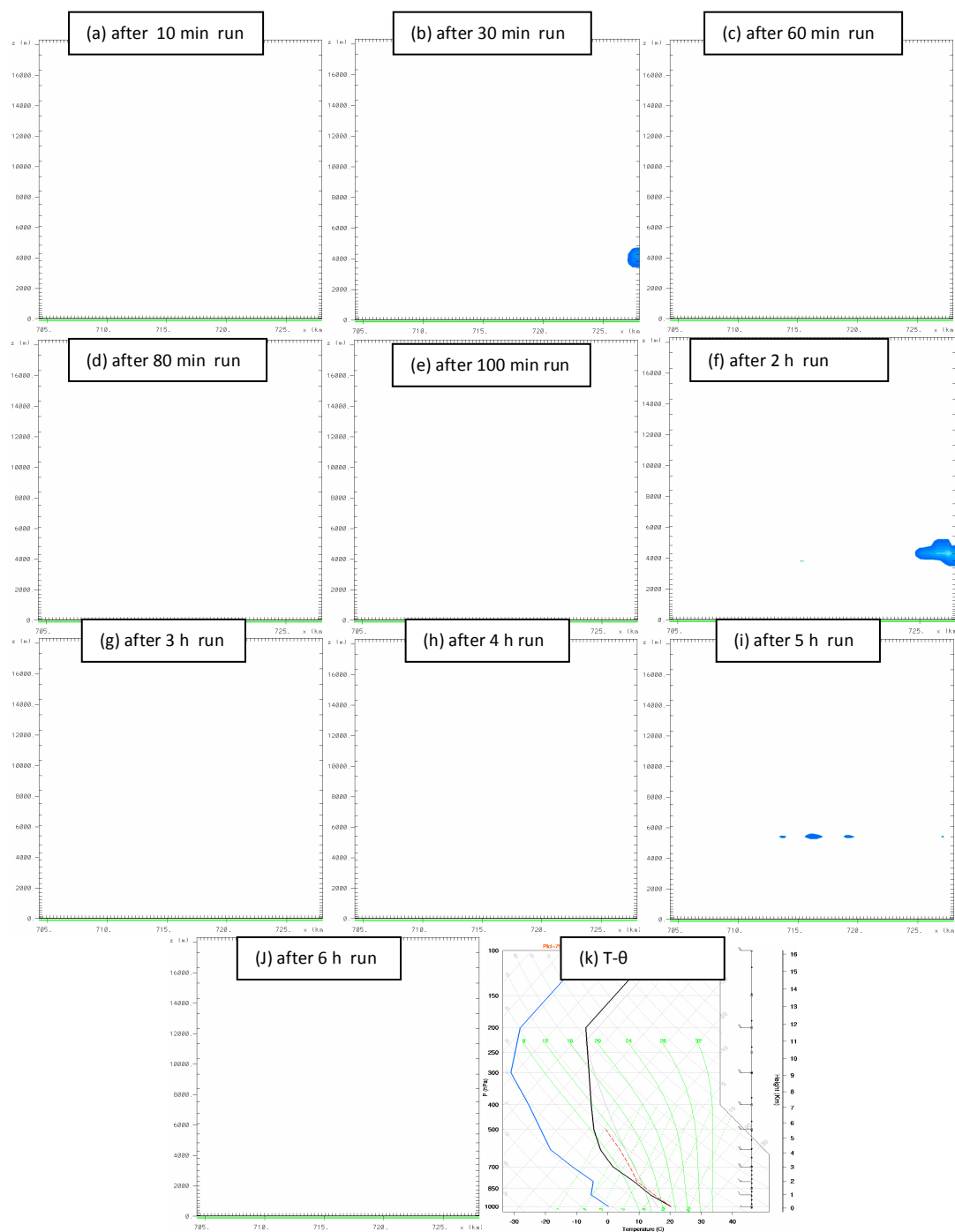
Το Σχήμα 3.25 αντιστοιχεί στους νεφικούς σχηματισμούς που προκύπτουν όταν γίνεται σπορά με ιωδιούχο άργυρο (AgI) στο Νεφικό σύστημα 2. Η μέγιστη τιμή αναλογίας μείγματος είναι $3.9 \frac{g}{kg}$, ενώ στην περίπτωση του χωρίς σπορά ήταν $0.9 \frac{g}{kg}$. Στην περίπτωση του Νεφικού σχηματισμού 2 είναι πιο έντονη η διαφορά στην αναλογία μείγματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος.



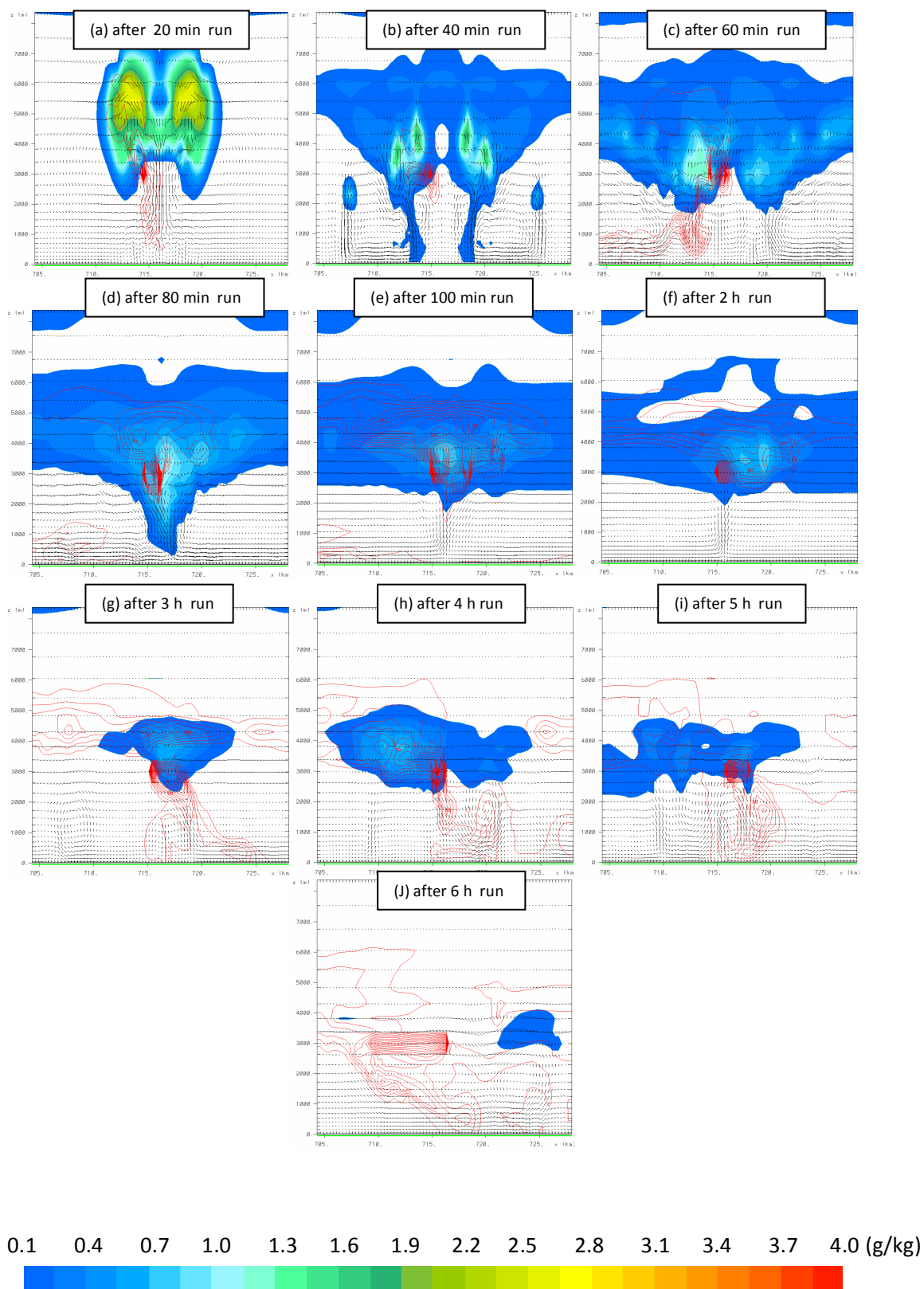
Σχήμα 3.13: Τεφίγραμμα νεφικού συστήματος 2 (k) και η εξέλιξη των νεφικών συστημάτων που προκύπτουν (a,b,c,d,e,f,g,h,i,j). Κατακόρυφος άξονας είναι το ύψος στην ατμόσφαιρα, οριζόντιος άξονας είναι η έκταση του domain, η χρωματική κλίμακα είναι η ολική αναλογία μείγματος των υδρομετεώρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος.



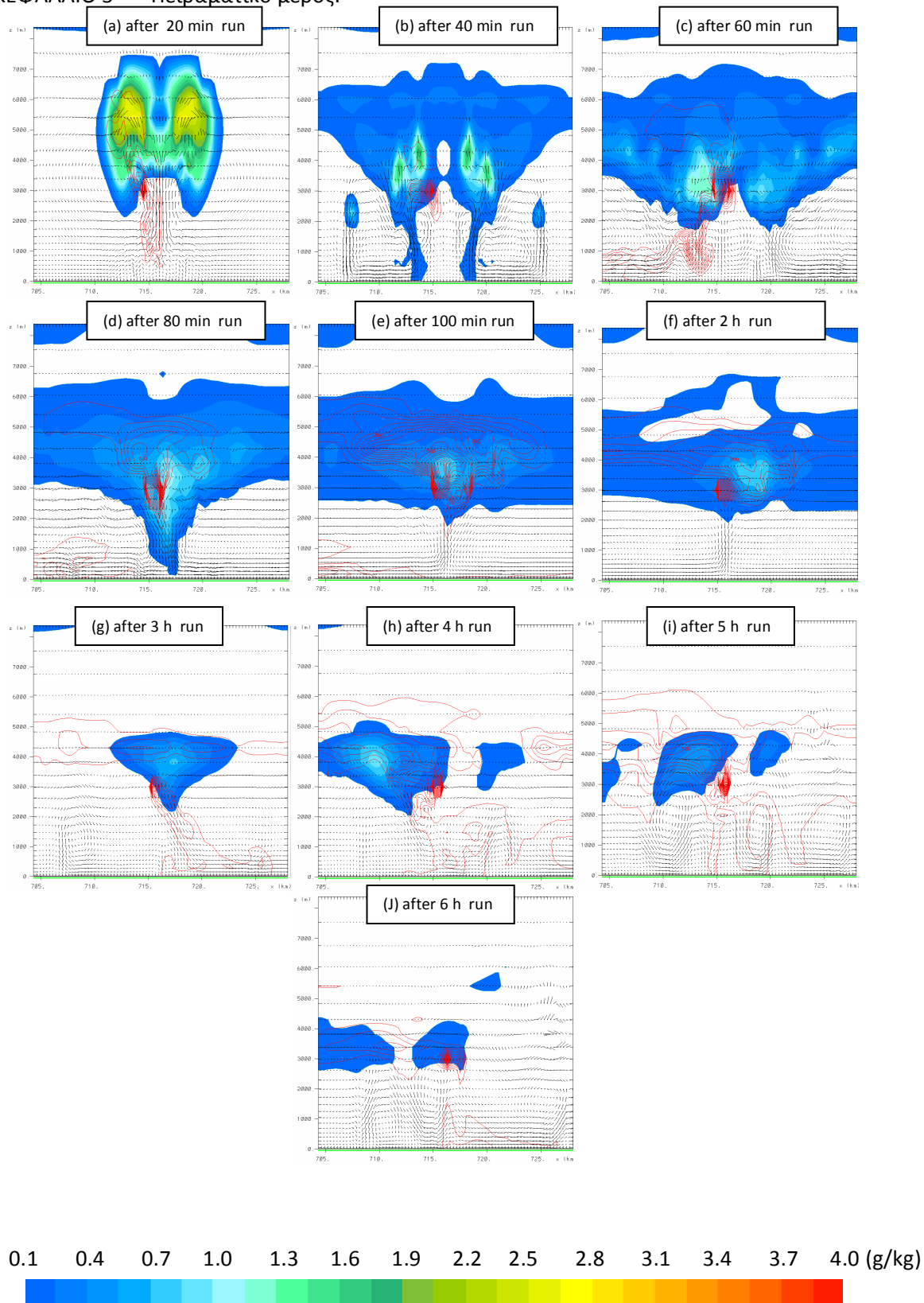
Σχήμα 3.14: Ραδιοβόληση Νεφικού σχυστήματος 2(k) και η εξέλιξη των νεφικών συστημάτων που προκύπτουν (a,b,c,d,e,f,g,h,i,j). Κατακόρυφος άξονας είναι το ύψος στην ατμόσφαιρα, οριζόντιος άξονας είναι η έκταση του domain, η χρωματική κλίμακα είναι η ολική αναλογία μείγματος των υδρομετεώρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος.



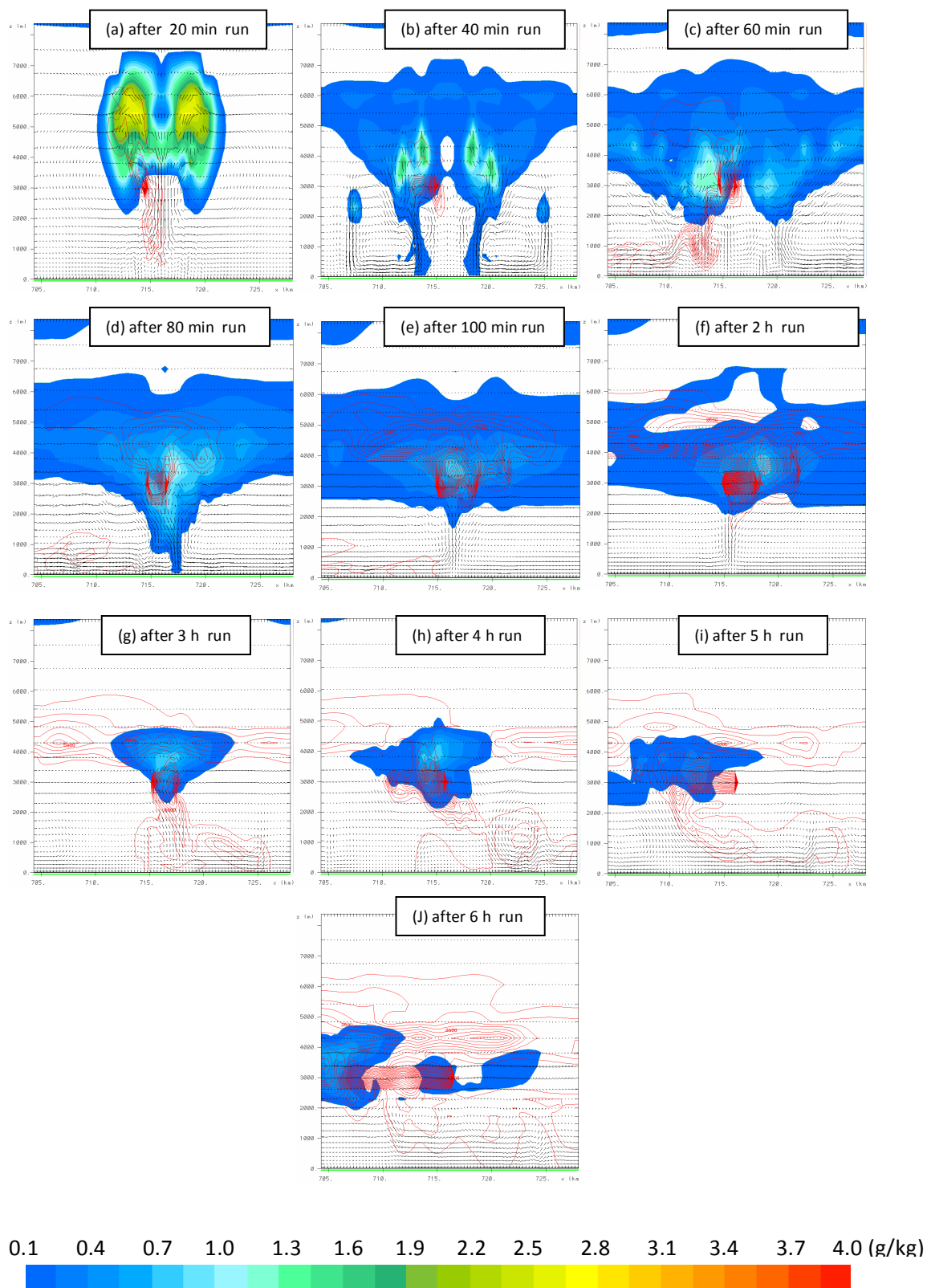
Σχήμα 3.15: Σπορά νεφικού συστήματος 1 στα 3000 m ύψος με ρυθμό εκπομπής NaCl $2.5 \# / \text{cm}^3 \cdot \text{s}$. a)12.20 b)12.40 c)13.00 d)13.20 e)13.40 f)14.00 g)15.00 h)16.00 i)17.00 j)18.00. Κατακόρυφος άξονας είναι το ύψος στην ατμόσφαιρα, οριζόντιος άξονας είναι η έκταση του domain, η χρωματική κλίμακα είναι η ολική αναλογία μείγματος των υδρομετεώρων, με κόκκινες ισοπληθείς είναι η συγκέντρωση NaCl ανα $10 \# / \text{cm}^{-3}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος.



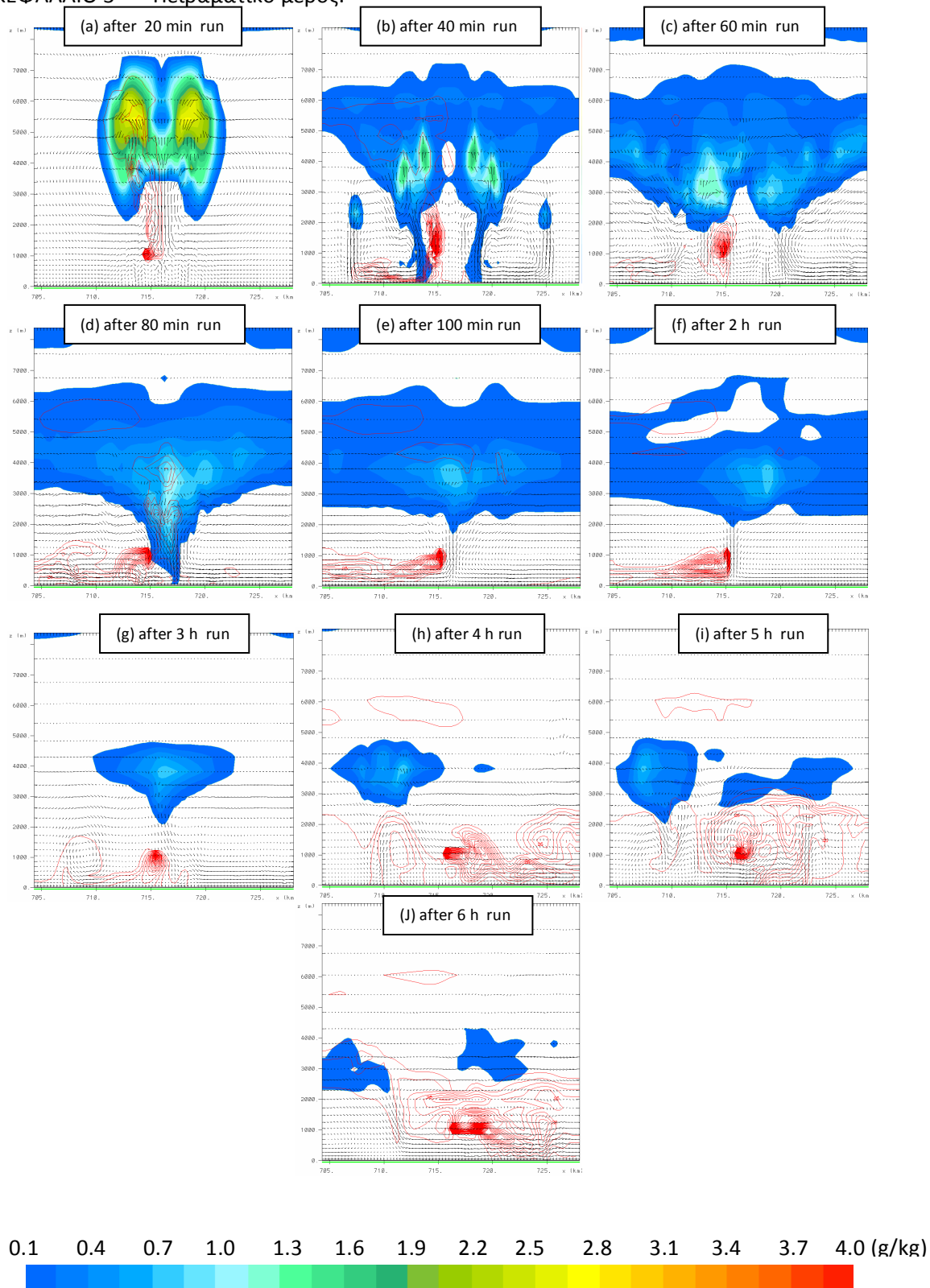
Σχήμα 3.16: νεφικού συστήματος 1 στα 3000 m ύψος με ρυθμό εκπομπής NaCl 25#/cm³s. a)12.20 b)12.40 c)13.00 d)13.20 e)13.40 f)14.00 g)15.00 h)16.00 i)17.00 j)18.00. Κατακόρυφος άξονας είναι το ύψος στην ατμόσφαιρα,οριζόντιος άξονας είναι η έκταση του domain, η χρωματική κλίμακα είναι η ολική αναλογία μείγματος των υδρομετεώρων,με κόκκινες ισοπληθείς είναι η συγκέντρωση NaCl ανά 100 #cm⁻³.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος.



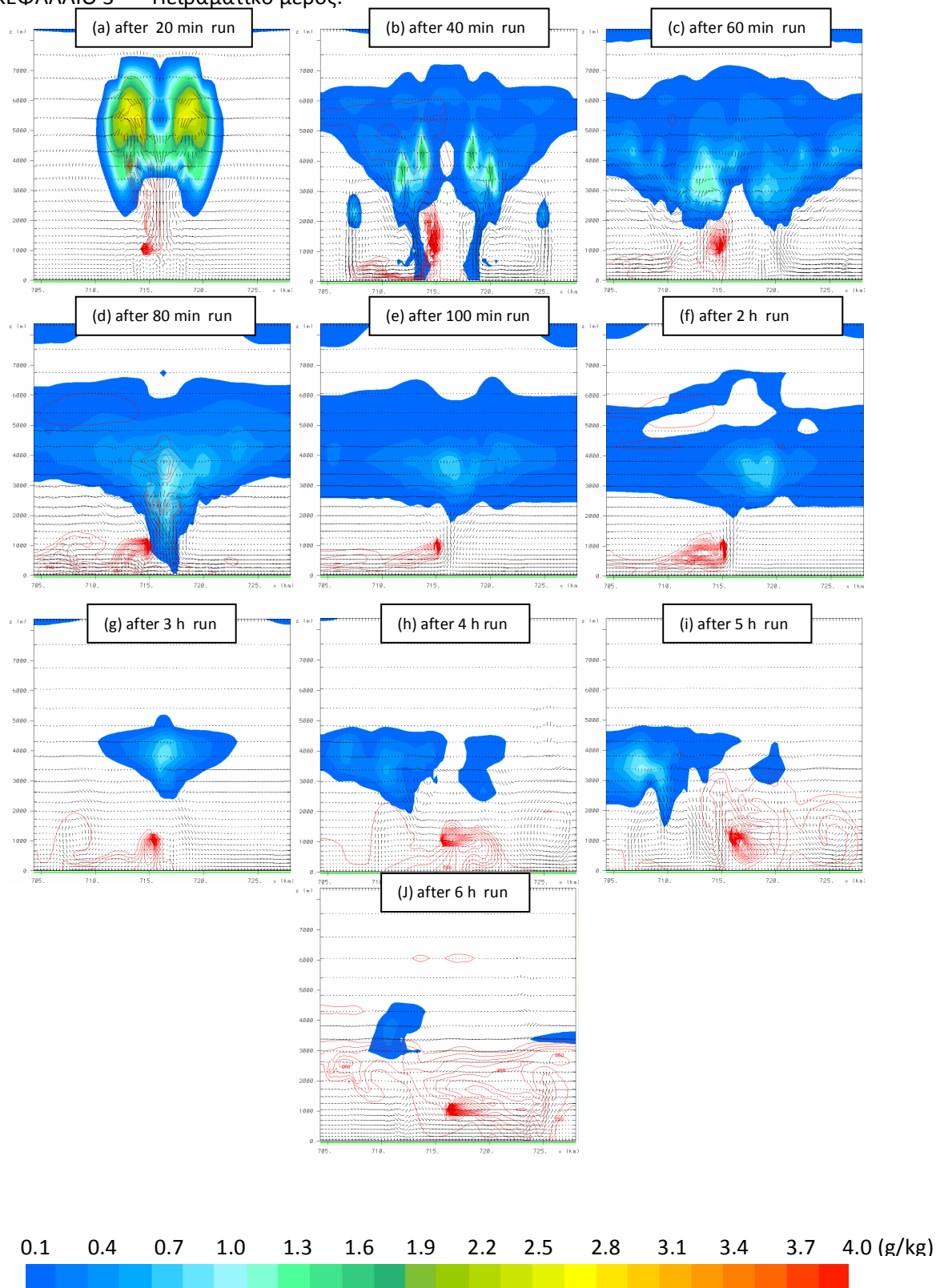
Σχήμα 3.17: Σπορά νεφικού συστήματος 1 στα 3000 m ύψος με ρυθμό εκπομπής NaCl $250\#/cm^3s$. a)12.20 b)12.40 c)13.00 d)13.20 e)13.40 f)14.00 g)15.00 h)16.00 i)17.00 j)18.00. Κατακόρυφος άξονας είναι το ύψος στην ατμόσφαιρα,οριζόντιος άξονας είναι η έκταση του domain, η χρωματική κλίμακα είναι η ολική αναλογία μείγματος των υδρομετεώρων,με κόκκινες ισοπληθείς είναι η συγκέντρωση NaCl ανά $500 \#/cm^{-3}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος.



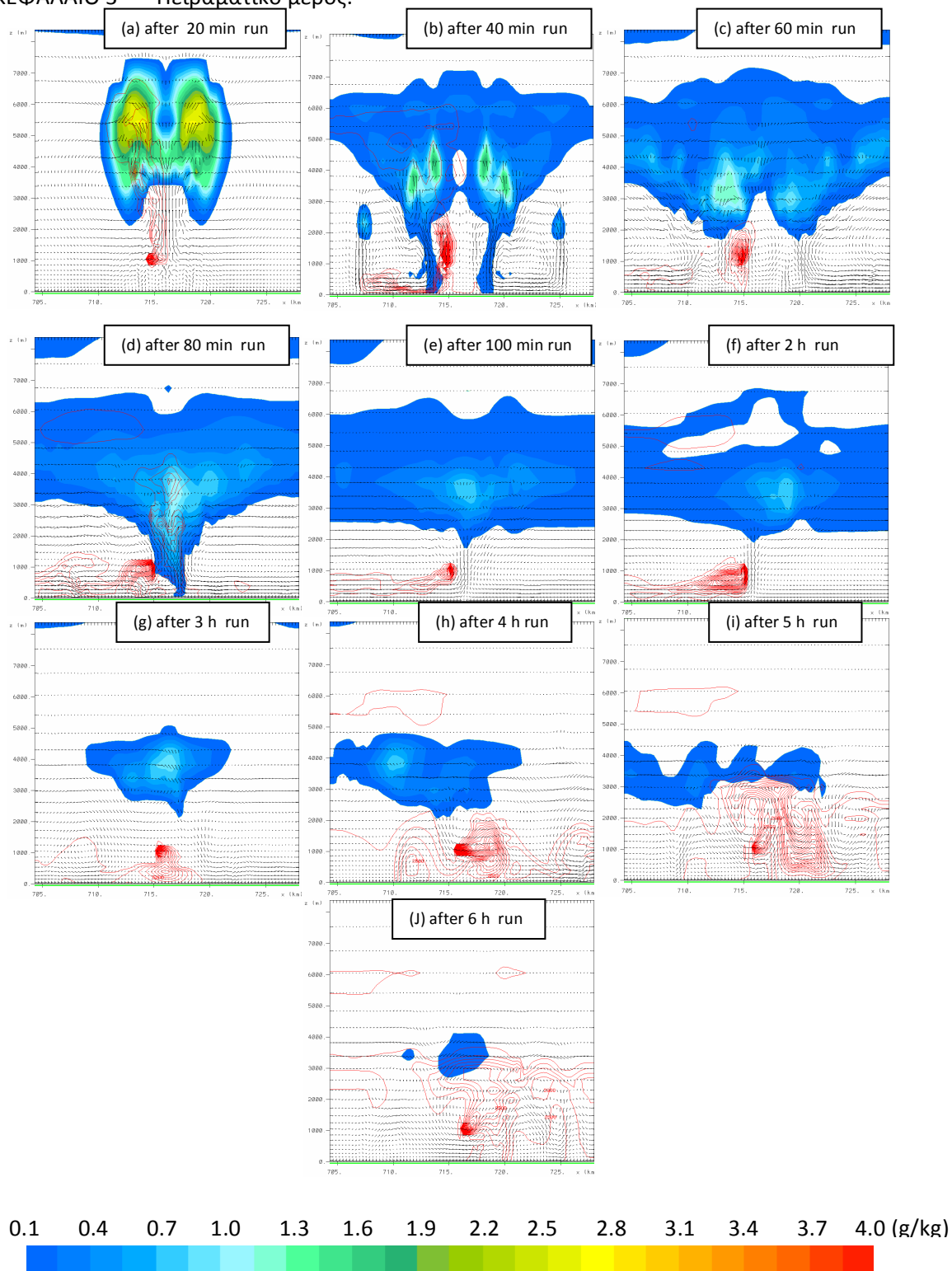
Σχήμα 3.18: Σπορά νεφικού συστήματος 1 στα 1000 m ύψος με ρυθμό εκπομπής NaCl $2.5\#/\text{cm}^3\text{s}$. a)12.20 b)12.40 c)13.00 d)13.20 e)13.40 f)14.00 g)15.00 h)16.00 i)17.00 j)18.00. Κατακόρυφος άξονας είναι το ύψος στην ατμόσφαιρα,οριζόντιος άξονας είναι η έκταση του domain, η χρωματική κλίμακα είναι η ολική αναλογία μείγματος των υδρομετεώρων,με κόκκινες ισοπληθείς είναι η συγκέντρωση NaCl ανά $4000\#/\text{cm}^3$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος.



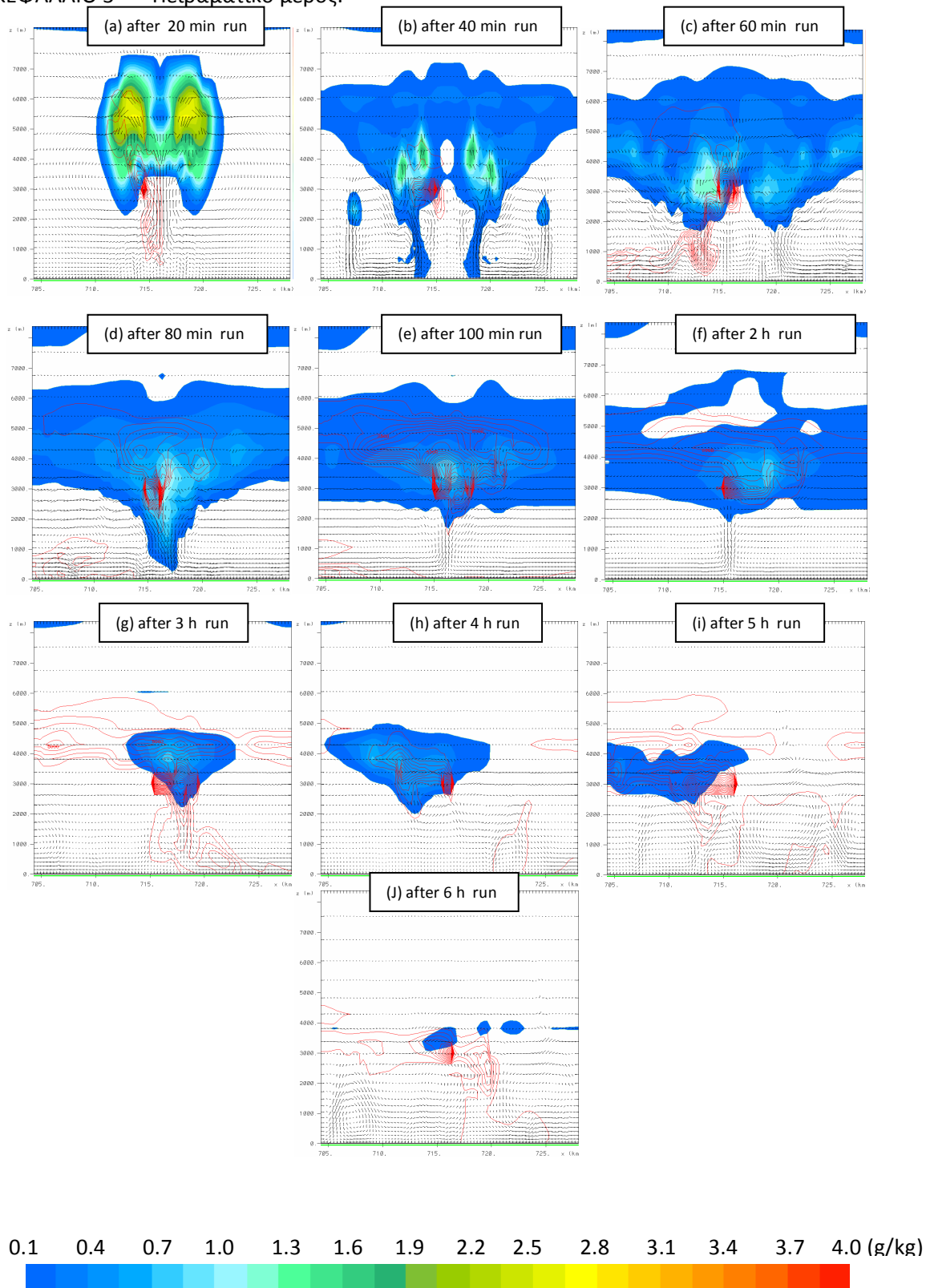
Σχήμα 3.19: Σπορά νεφικού συστήματος 1 στα 1000 m ύψος με ρυθμό εκπομπής NaCl $25\#/\text{cm}^3\text{s}$. a)12.20 b)12.40 c)13.00 d)13.20 e)13.40 f)14.00 g)15.00 h)16.00 i)17.00 j)18.00. Κατακόρυφος άξονας είναι το ύψος στην ατμόσφαιρα,οριζόντιος άξονας είναι η έκταση του domain, η χρωματική κλίμακα είναι η ολική αναλογία μείγματος των υδρομετεώρων,με κόκκινες ισοπληθείς είναι η συγκέντρωση NaCl ανά $100\#/\text{cm}^{-3}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος.



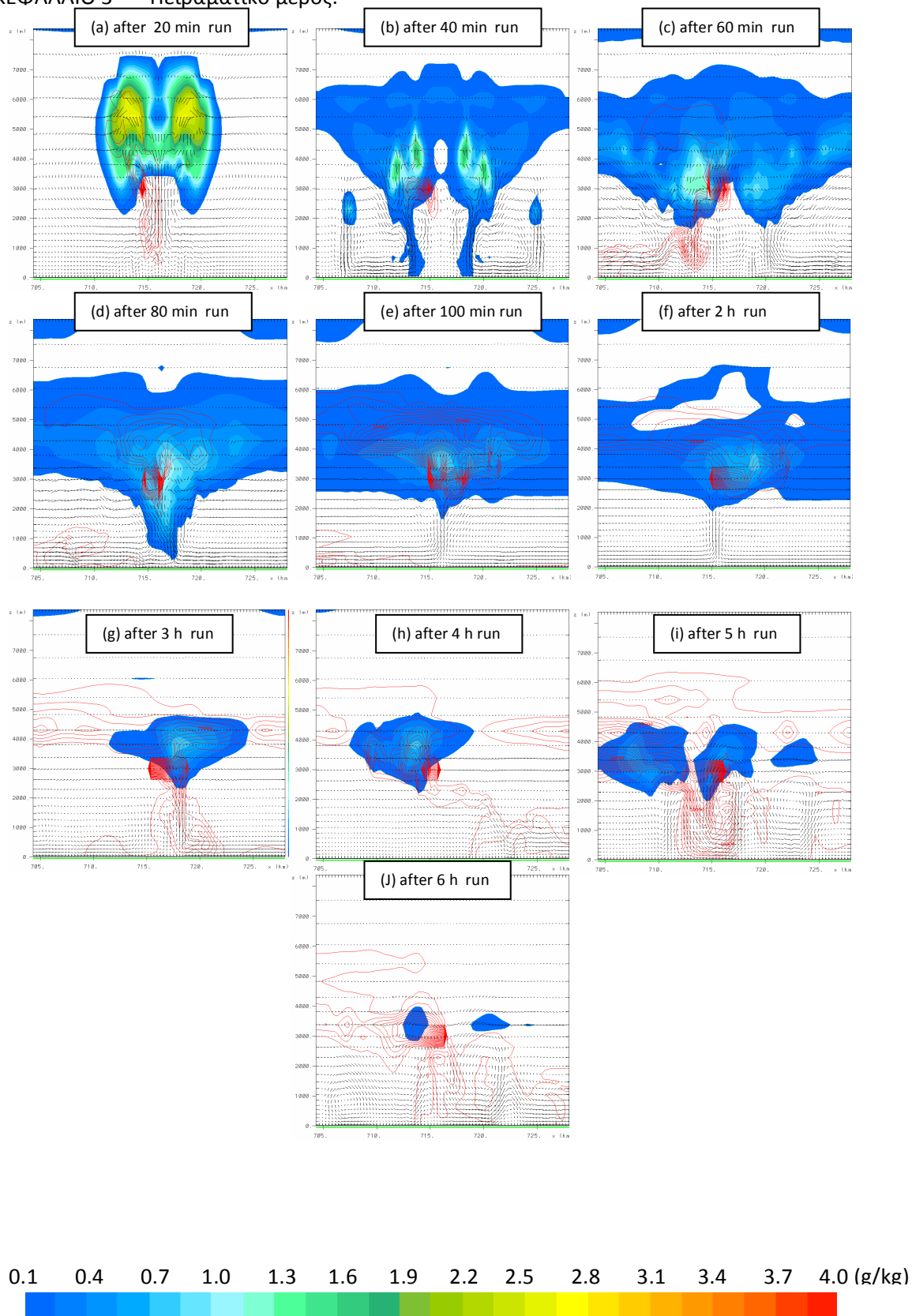
Σχήμα 3.20: Σπορά νεφικού συστήματος 1 στα 1000 m ύψος με ρυθμό εκπομπής NaCl $250\#/cm^3s$. a)12.20 b)12.40 c)13.00 d)13.20 e)13.40 f)14.00 g)15.00 h)16.00 i)17.00 j)18.00. Κατακόρυφος άξονας είναι το ύψος στην ατμόσφαιρα,οριζόντιος άξονας είναι η έκταση του domain, η χρωματική κλίμακα είναι η ολική αναλογία μείγματος των υδρομετεώρων,με κόκκινες ισοπληθείς είναι η συγκέντρωση NaCl ανά $500 \#/cm^{-3}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος.



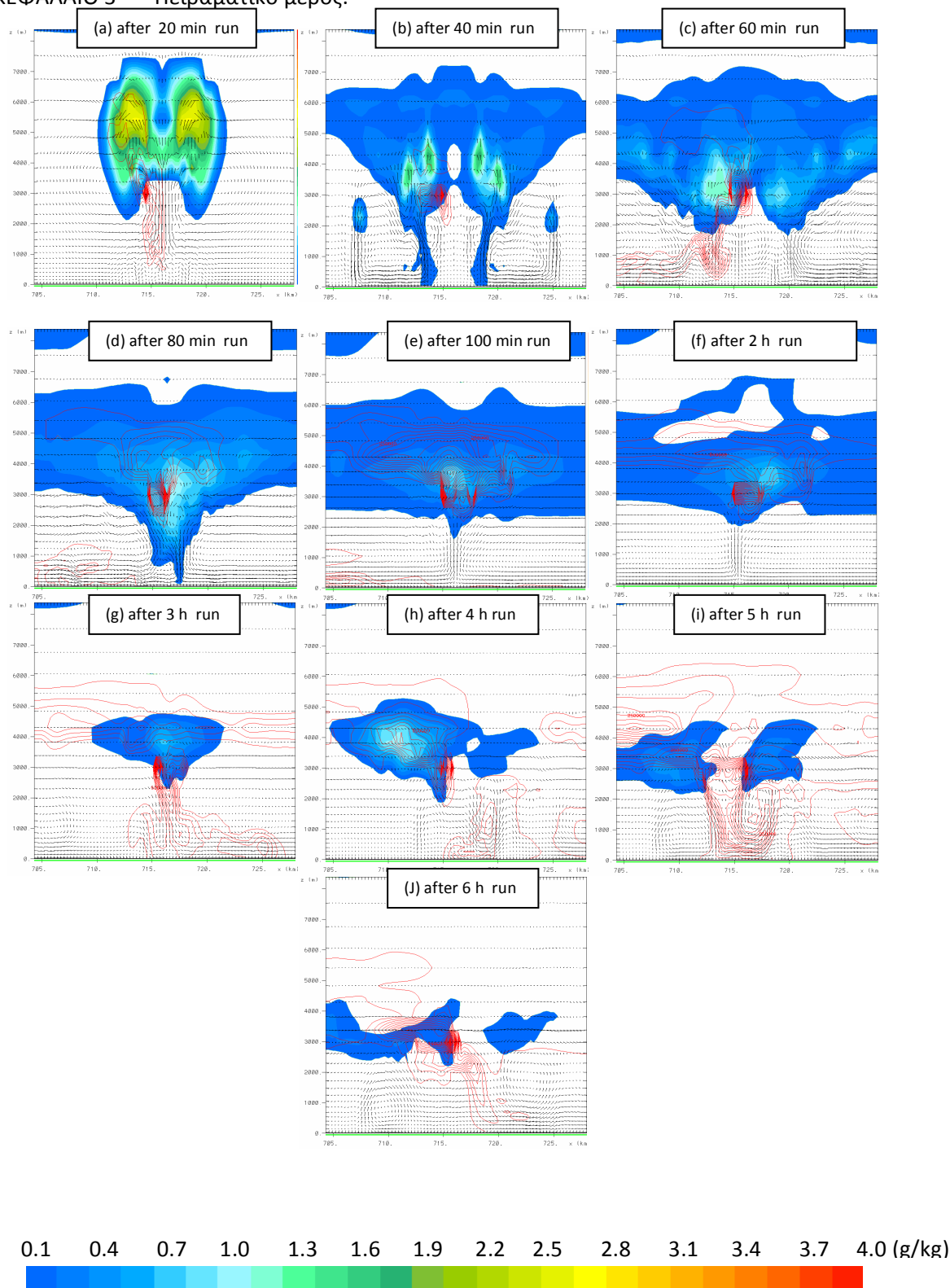
Σχήμα 3.21: Σπορά νεφικού συστήματος 1 στα 3000 m ύψος με ρυθμό εκπομπής AgI $2.5\#/cm^3s$. a)12.20 b)12.40 c)13.00 d)13.20 e)13.40 f)14.00 g)15.00 h)16.00 i)17.00 j)18.00. Κατακόρυφος άξονας είναι το ύψος στην ατμόσφαιρα,οριζόντιος άξονας είναι η έκταση του domain, η χρωματική κλίμακα είναι η ολική αναλογία μείγματος των υδρομετεώρων,με κόκκινες ισοπληθείς είναι η συγκέντρωση AgI ανά $2000\#/cm^{-3}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος.



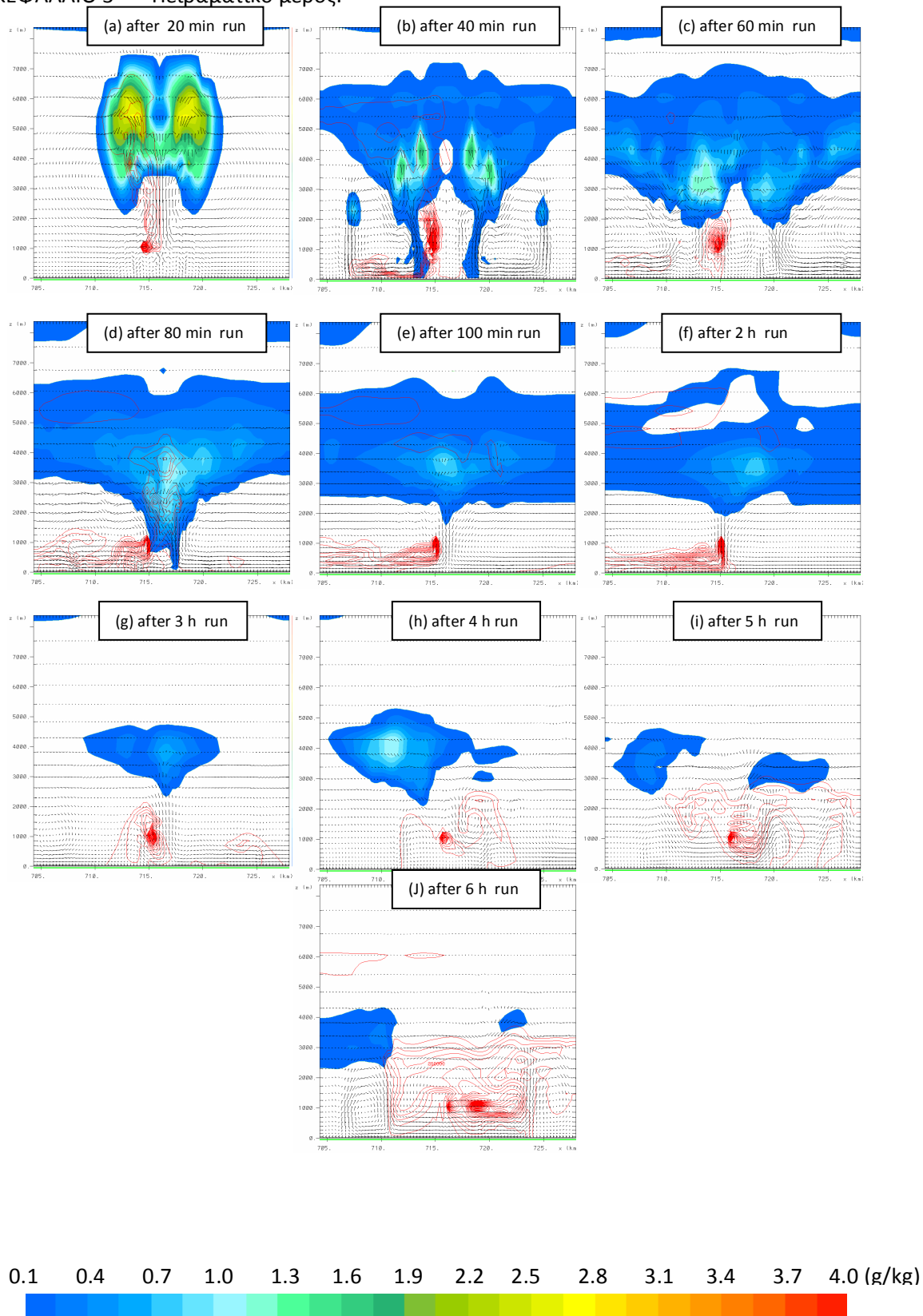
Σχήμα 3.22: Σπορά νεφικού συστήματος 1 στα 3000 m ύψος με ρυθμό εκπομπής AgI $25\#/cm^3s$. a)12.20 b)12.40 c)13.00 d)13.20 e)13.40 f)14.00 g)15.00 h)16.00 i)17.00 j)18.00. Κατακόρυφος άξονας είναι το ύψος στην ατμόσφαιρα, οριζόντιος άξονας είναι η έκταση του domain, η χρωματική κλίμακα είναι η ολική αναλογία μείγματος των υδρομετεώρων, με κόκκινες ισοπληθείς είναι η συγκέντρωση AgI ανά $1000 \#/cm^{-3}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος.



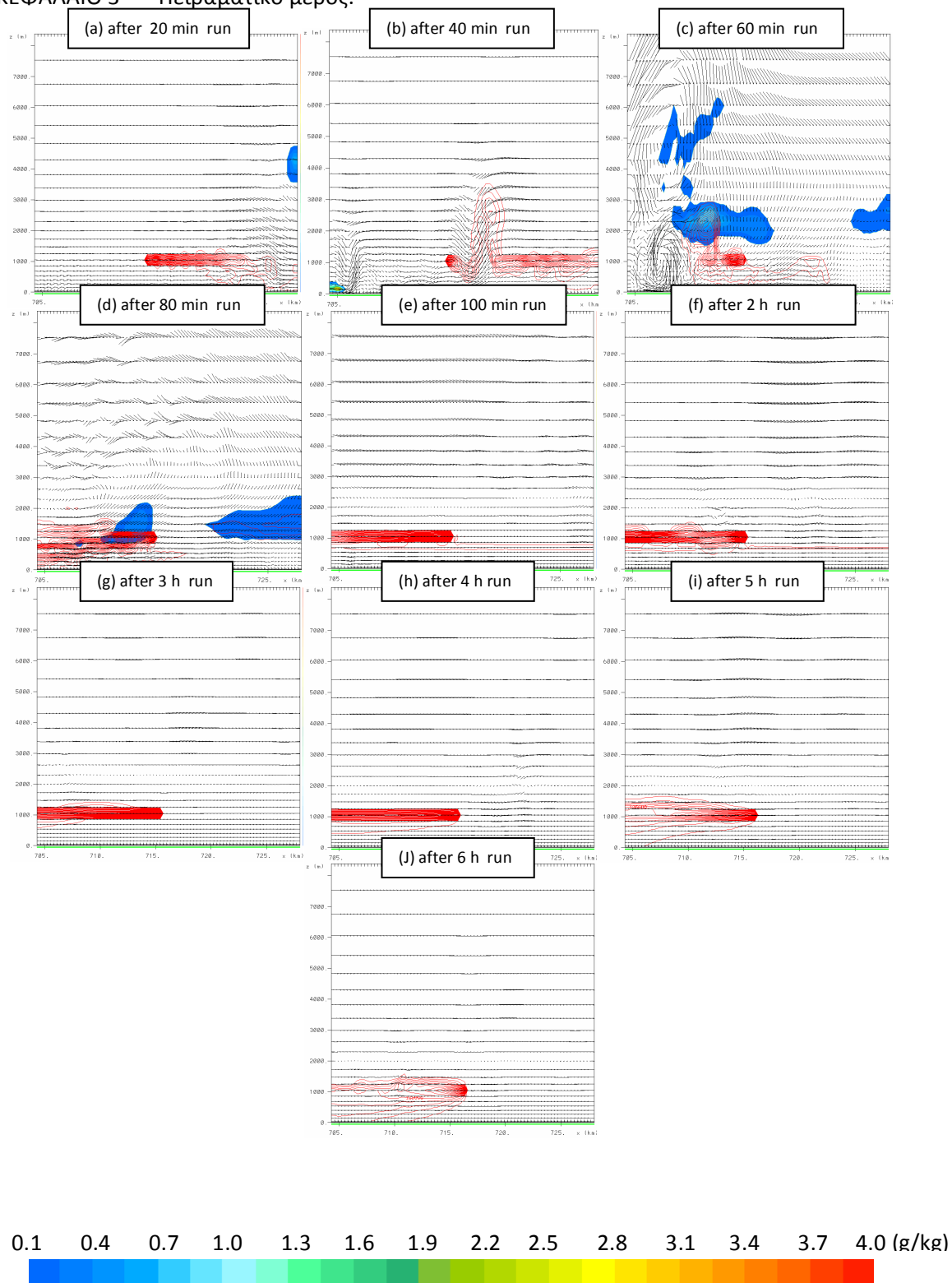
Σχήμα 3.23: Σπορά νεφικού συστήματος 1 στα 3000 m ύψος με ρυθμό εκπομπής AgI $250\#/\text{cm}^3\text{s}$. a)12.20 b)12.40 c)13.00 d)13.20 e)13.40 f)14.00 g)15.00 h)16.00 i)17.00 j)18.00. Κατακόρυφος άξονας είναι το ύψος στην ατμόσφαιρα,οριζόντιος άξονας είναι η έκταση του domain, η χρωματική κλίμακα είναι η ολική αναλογία μείγματος των υδρομετεώρων,με κόκκινες ισοπληθείς είναι η συγκέντρωση AgI ανά $10.000\#/\text{cm}^3$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος.



Σχήμα 3.24: Σπορά νεφικού συστήματος 1 στα 1000 m ύψος με ρυθμό εκπομπής AgI $250\#/cm^3s$. a)12.20 b)12.40 c)13.00 d)13.20 e)13.40 f)14.00 g)15.00 h)16.00 i)17.00 j)18.00. Κατακόρυφος άξονας είναι το ύψος στην ατμόσφαιρα,οριζόντιος άξονας είναι η έκταση του domain, η χρωματική κλίμακα είναι η ολική αναλογία μείγματος των υδρομετεώρων,με κόκκινες ισοπληθείς είναι η συγκέντρωση AgI ανά $50000 \#/cm^{-3}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος.



Σχήμα 3.25: Σπορά νεφικού συστήματος 2 στα 1000 m ύψος με ρυθμό εκπομπής AgI $250\#/cm^3s$. a)12.20 b)12.40 c)13.00 d)13.20 e)13.40 f)14.00 g)15.00 h)16.00 i)17.00 j)18.00. Κατακόρυφος άξονας είναι το ύψος στην ατμόσφαιρα,οριζόντιος άξονας είναι η έκταση του domain, η χρωματική κλίμακα είναι η ολική αναλογία μείγματος των υδρομετεώρων,με κόκκινες ισοπληθείς είναι η συγκέντρωση AgI ανά $25000\text{ gr}cm^{-3}$.

3.4. Στατιστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

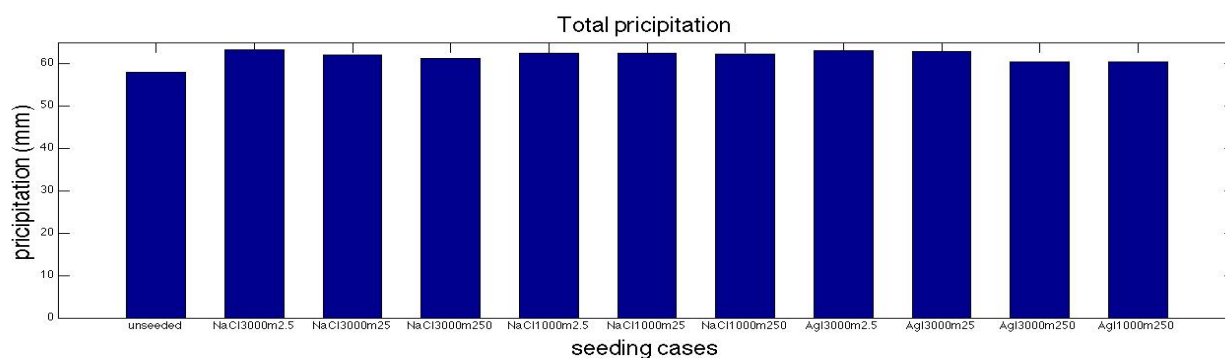
Στη συνέχεια έγινε μία στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων, στην οποία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Matlab. Αρχικά υπολογίσθηκε ο αθροιστικός υετός σε *mm* για τα διάφορα σενάρια. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 8 και στο Σχήμα 3.26.

Η σπορά σε όλα τα σενάρια έφερε ενίσχυση του αθροιστικού υετού. Το σενάριο με την μεγαλύτερη τιμή αθροιστικού υετού 63,3 *mm*, ήταν εκείνο στο οποίο πραγματοποιήθηκε σπορά NaCl, στο Νεφικό σύστημα 1, στα 3000 *m* με ρυθμό εκπομπής $2.5 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$. Η ενίσχυση στον αθροιστικό υετό ήταν της τάξεως του 9,1%. Αμέσως μετά ακολουθεί το σενάριο σποράς με AgI στο Νεφικό σύστημα 1 σε ύψος 3000 *m*, με ρυθμό εκπομπής $2.5 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$. Η τιμή του αθροιστικού υετού σε αυτήν την περίπτωση ήταν 63,1 *mm*. Φαίνεται λοιπόν, ότι πιο αποτελεσματικός στην ενίσχυση του αθροιστικού υετού είναι ο μικρότερος ρυθμός εκπομπής που χρησιμοποιήθηκε.

Πίνακας 8

Αθροιστικός υετός για τα διάφορα σενάρια σποράς.

Σενάρια	total pricipitation (<i>mm</i>)
Χωρίς Σπορά	58
NaCl – 3000m – $2.5 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$	63.3
NaCl – 3000m – $25 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$	62
NaCl – 3000m – $250 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$	61.3
NaCl – 1000m – $2.5 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$	62.4
NaCl – 1000m – $25 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$	62.4
NaCl – 1000m – $250 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$	62.3
AgI – 3000m – $2.5 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$	63.1
AgI – 3000m – $25 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$	62.8
AgI – 3000m – $250 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$	60.3
AgI – 1000m – $250 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$	60.3



Σχήμα 3.26: Αθροιστικός υετός σε mm για κάθε σενάριο σποράς στο Νεφικό Σύστημα 1 και η σύγκρισή τους με την κατάσταση χωρίς σπορά. Κατα σειρά οι μπάρες αντιστοιχούν: i) χωρίς σπορά, ii) σπορά με NaCl στα 3000m με ρ.ε. $2.5 \# \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$, iii) σπορά με NaCl στα 3000m με ρ.ε. $25 \# \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$, iv) σπορά με NaCl στα 3000m με ρ.ε. $250 \# \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$, v) σπορά με NaCl στα 1000m με ρ.ε. $2.5 \# \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$, vi) σπορά με NaCl στα 1000m με ρ.ε. $25 \# \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$, vii) σπορά με NaCl στα 1000m με ρ.ε. $250 \# \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$, viii) σπορά με Agl στα 3000m με ρ.ε. $2.5 \# \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$, ix) σπορά με Agl στα 3000m με ρ.ε. $25 \# \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$, x) σπορά με Agl στα 3000m με ρ.ε. $250 \# \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$,

Εκτός από τα αποτελέσματα στον αθροιστικό υετό, ενδιαφέρον έχει να εξεταστεί και η χρονική διακύμανση του παραγόμενου υετού.

Στα διαγράμματα των Σχημαμάτων 3.27,3.28,3.29 παριστάνεται ο μέγιστος ρυθμός υετού συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης για τις περιπτώσεις σποράς Agl, NaCl στα 3000 m και NaCl στα 1000 m αντίστοιχα. Σε όλες τις περιπτώσεις φαίνεται η χρονική διακύμανση στον ρυθμό του παραγόμενου υετού. Δημιουργούνται τρία μέγιστα περί τα πρώτα 40 λεπτά ,60 λεπτά και 80 λεπτά προσομοίωσης αντίστοιχα. Η τροποποίηση αρχίζει να γίνεται σημαντική περί τα πρώτα 40 λεπτά της προσομοίωσης, ενώ μέχρι τότε υπερισχύουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά του νεφικού συστήματος. Οι διαφορές στον ρυθμό του υετού είναι έντονες στο τρίτο μέγιστο της κατανομής.

Στην περίπτωση σποράς με Agl (Σχήμα 3.27), παρά την αύξηση στον αθροιστικό υετό που αναφέραμε, κατά τη διάρκεια του τρίτου μεγίστου παρατηρούνται τα εξής: η τροποποίηση φέρνει μία καθυστέρηση στην εμφάνιση του τρίτου μεγίστου περί τα 20 λεπτά. Στην διάρκειά του οι περιπτώσεις σποράς με Agl στα 3000m με ρυθμούς εκπομπής $2.5 \# \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$ και $25 \# \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$ φέρνουν αύξηση στο ρυθμό υετού σε σχέση με την αρχική περίπτωση χωρίς σπορά. Αντίθετα, οι περιπτώσεις σποράς Agl με ρυθμούς

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος.

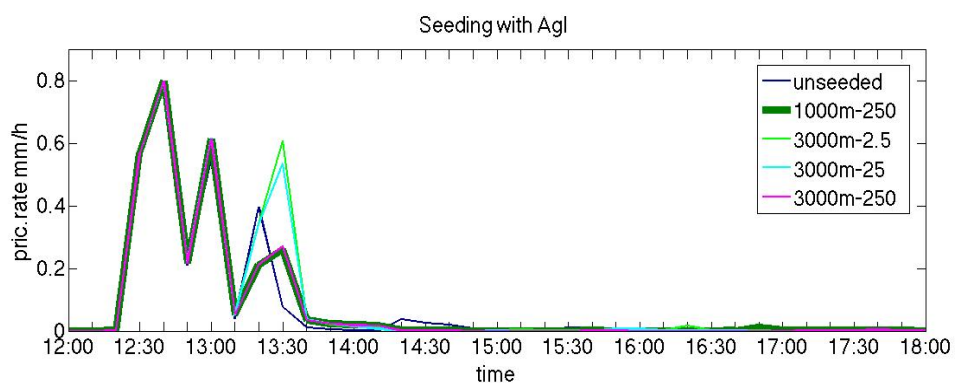
εκπομπής $250 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ στα 1000 m και στα 3000 m φέρνουν μείωση στο ρυθμό υετού. η παρατήρηση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι όταν ο ρυθμός εκπομπής είναι σχετικά μεγάλος, επειδή μεγαλύτερος αριθμός πυρήνων παγοποίησης έχει να ανταγωνιστεί για το ίδιο περιεχόμενο υγρασίας μέσα στο νέφος, δημιουργούνται πολλά υδρομετέωρα με μικρές ακτίνες, τα οποία έχουν μικρούς συντελεστές συλλογής και δεν σχηματίζουν μεγαλύτερα υδρομετέωρα με ταχύτητες κατακρήμνισης. (Φαινόμενο overseeding)

Παρόμοια είναι η εικόνα και στην περίπτωση σποράς με NaCl στα 3000 m (Σχήμα 3.28). Και στην περίπτωση της σποράς με NaCl στα 1000 m (Σχήμα 3.29) παρατηρείται μία καθυστέρηση του τρίτου μεγίστου, όμως η αύξηση του ρυθμού εκπομπής οδηγεί στην αύξηση του ρυθμού εκπομπής κατά τη διάρκεια του τρίτου μεγίστου. Η παρατήρηση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι επειδή η σπορά έγινε στη βάση του νέφους (1000 m), η ανάμειξη των σωματιδίων σποράς είναι μικρότερη σε σχέση με την σπορά μέσα στο νέφος (3000 m) και είναι λιγότερο πιθανό να εμφανιστούν φαινόμενα overseeding.

Τέλος, είναι ενδιαφέρον να διερευνηθεί και η συμπεριφορά των δύο υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στα δύο ύψη που έγινε η σπορά. Από τον Πίνακα 8 φαίνεται ότι πιο αποτελεσματικό στην ενίσχυση του παραγόμενου υετού όταν η σπορά γίνεται στο ύψος των 1000 m είναι το NaCl. Στην περίπτωση όμως που η σπορά γίνεται στο ύψος των 3000 m πιο αποτελεσματικός είναι ο AgI αφού φένει καλό ποσοστό ενίσχυσης με τον μικρότερο ρυθμό εκπομπής. Ωστόσο. Στο Σχήμα 3.30 φαίνεται η σύγκριση της επίδρασης των δύο υλικών στο ρυθμό υετού όταν η σπορά γίνεται στα 1000 m .

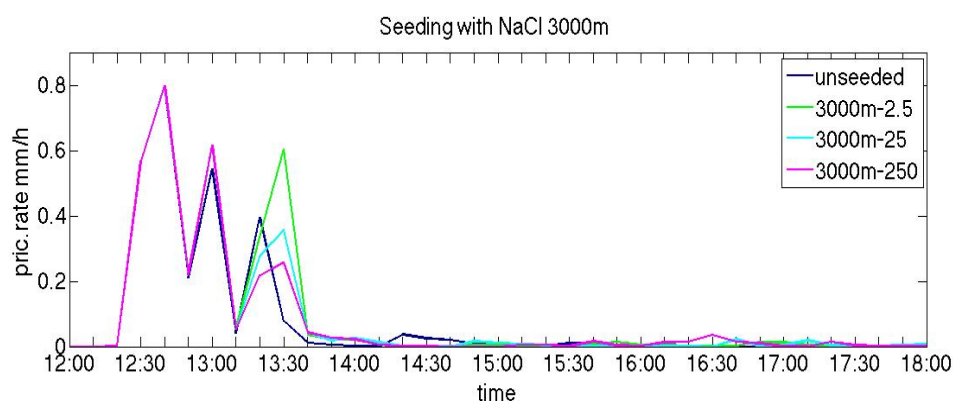
Στο διάγραμμα 3.32 φαίνονται τα αποτελέσματα σποράς του νεφικού σχηματισμού της ραδιοβόληση No.2. Συγκεκριμένα, φαίνονται οι μέγιστες τιμές υετού. Οι μπλέ στήλες αντιστοιχούν στην κατάσταση χωρίς σπορά, ενώ οι κόκκινες αντιστοιχούν στην κατάσταση που έγινε σπορά ιωδιούχο αργύρου σε ύψος 1000 m , με ρυθμό εκπομπής $250 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$. Το νεφικό σύστημα αντιστοιχεί σε ένα νεφικό σύστημα ευσταθές και χαμηλό σε υγρασία. Χωρίς σπορά είχε σχεδόν μηδενικό υετό $0.9 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$. Μετά τη σπορά είχε $3.9 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$. Η ενίσχυση του συνολικού υετού είναι της τάξεως του 300% περίπου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος.

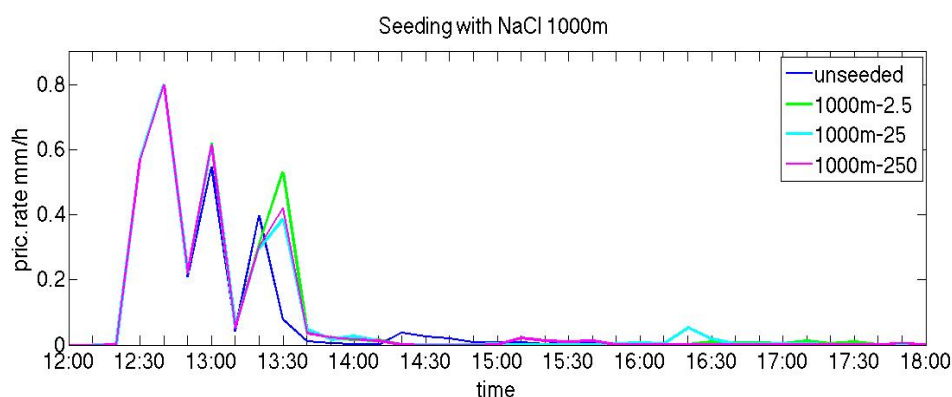


Σχήμα 3.27: Σύγκριση μέγιστων τιμών υετού ,με και χωρίς σπορά του νέφους με ιωδιούχο άργυρο. Στον κατακόρυφο άξονα είναι οι μέγιστες τιμές υετού σε mmh^{-1} και στον οριζόντιο ο χρόνος. Η μπλέ γραμμή αντιστοιχεί στην κατάσταση χωρίς σπορά, η πράσινη στην περίπτωση σποράς στα 1000m με ρυθμό εκπομπής $250 \#cm^{-3}s^{-1}$, η λαχανί στην περίπτωση σποράς στα 3000m με ρυθμό εκπομπής $2.5 \#cm^{-3}s^{-1}$, η σιέλ στην περίπτωση σποράς στα 3000m με ρυθμό εκπομπής $25 \#cm^{-3}s^{-1}$ και η φούξια στην περίπτωση σποράς στα 3000m με ρυθμό εκπομπής $250 \#cm^{-3}s^{-1}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος.

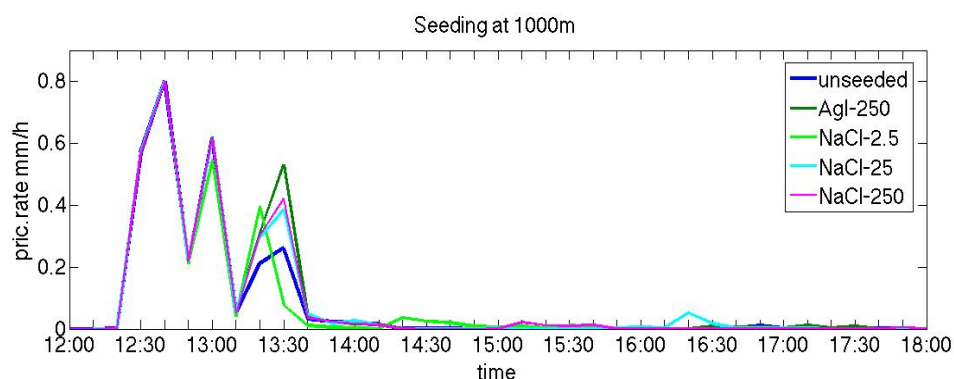


Σχήμα 3.28: Σύγκριση μέγιστων τιμών υετού ,με και χωρίς σπορά του νέφους με χλωριούχο νάτριο. Στον κατακόρυφο άξονα είναι οι μέγιστες τιμές υετού σε mmh^{-1} και στον οριζόντιο ο χρόνος. Η μπλέ γραμμή αντιστοιχεί στην κατάσταση χωρίς σπορά, η λαχανί στην περίπτωση σποράς στα 3000m με ρυθμό εκπομπής $2.5 \#cm^{-3}s^{-1}$, η σιέλ στην περίπτωση σποράς στα 3000m με ρυθμό εκπομπής $25 \#cm^{-3}s^{-1}$ και η φούξια στην περίπτωση σποράς στα 3000m με ρυθμό εκπομπής $250 \#cm^{-3}s^{-1}$.

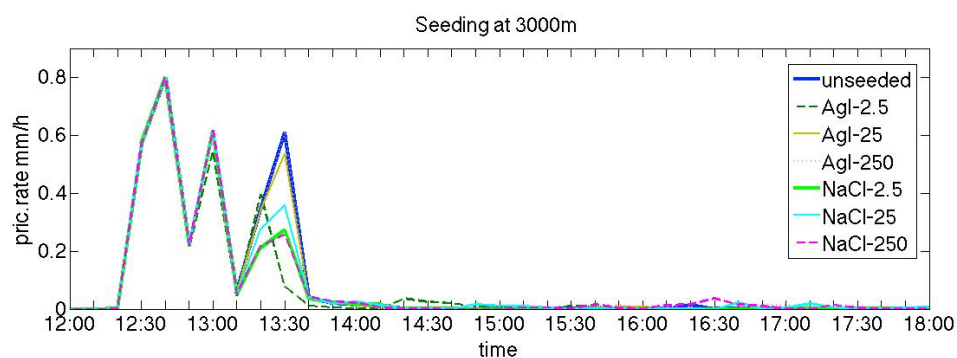


Σχήμα 3.29: Σύγκριση μέγιστων τιμών υετού ,με και χωρίς σπορά του νέφους με χλωριούχο νάτριο. Στον κατακόρυφο άξονα είναι οι μέγιστες τιμές υετού σε mmh^{-1} και στον οριζόντιο ο χρόνος. Η μπλέ γραμμή αντιστοιχεί στην κατάσταση χωρίς σπορά, η λαχανί στην περίπτωση σποράς στα 1000m με ρυθμό εκπομπής $2.5 \#cm^{-3}s^{-1}$, η σιέλ στην περίπτωση σποράς στα 1000m με ρυθμό εκπομπής $25 \#cm^{-3}s^{-1}$ και η φούξια στην περίπτωση σποράς στα 1000m με ρυθμό εκπομπής $250 \#cm^{-3}s^{-1}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος.

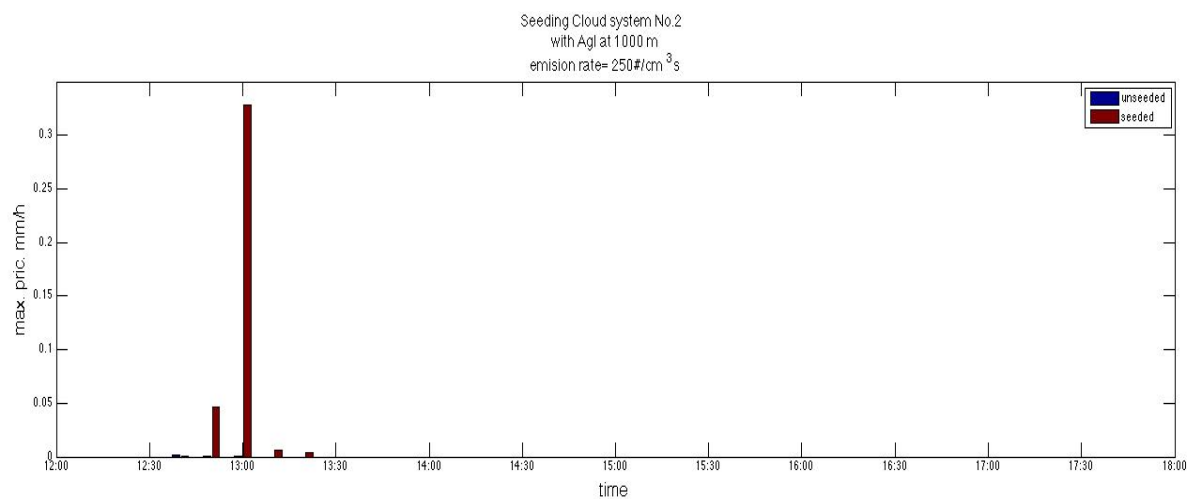


Σχήμα 3.30: Σύγκριση μέγιστων τιμών υετού, χωρίς και με σπορά του νέφους στα 1000m. Στον κατακόρυφο άξονα είναι οι μέγιστες τιμές υετού σε mmh^{-1} και στον οριζόντιο ο χρόνος. Η μπλέ γραμμή αντιστοιχεί στην κατάσταση χωρίς σπορά, η πράσινη στην περίπτωση σποράς AgI με ρυθμό εκπομπής $250 \#cm^{-3}s^{-1}$, η λαχανί στην περίπτωση σποράς με NaCl με ρυθμό εκπομπής $2.5 \#cm^{-3}s^{-1}$, η σιέλ στην περίπτωση σποράς με NaCl με ρυθμό εκπομπής $25 \#cm^{-3}s^{-1}$ και η φούξια στην περίπτωση σποράς με NaCl με ρυθμό εκπομπής $250 \#cm^{-3}s^{-1}$.



Σχήμα 3.31 Σύγκριση μέγιστων τιμών υετού, χωρίς και με σπορά του νέφους στα 1000m. Στον κατακόρυφο άξονα είναι οι μέγιστες τιμές υετού σε mmh^{-1} και στον οριζόντιο ο χρόνος. Η μπλέ γραμμή αντιστοιχεί στην κατάσταση χωρίς σπορά, η πράσινη στην περίπτωση σποράς AgI με ρυθμό εκπομπής $2.5 \#cm^{-3}s^{-1}$, η κίτρινη στην περίπτωση σποράς με AgI με ρυθμό εκπομπής $25 \#cm^{-3}s^{-1}$, η ρόζ στην περίπτωση σποράς με AgI με ρυθμό εκπομπής $250 \#cm^{-3}s^{-1}$, η λαχανί στην περίπτωση σποράς με NaCl με ρυθμό εκπομπής $2.5 \#cm^{-3}s^{-1}$, η σιέλ στην περίπτωση σποράς με NaCl με ρυθμό εκπομπής $25 \#cm^{-3}s^{-1}$ και η φούξια στην περίπτωση σποράς με NaCl με ρυθμό εκπομπής $250 \#cm^{-3}s^{-1}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Πειραματικό μέρος.



Σχήμα 3.32: Σύγκριση μεγίστων τιμών υετού χωρίς τροποποίηση αλλά και με σπορά του νέφους στο νεφικό σύστημα 2 σε ύψος 1000 m με ιωδιούχο άργυρο και ρυθμό εκπομπής 250#/cm⁻³s⁻¹. Στον κατακόρυφο άξονα είναι οι μέγιστες τιμές υετού σε mmh⁻¹ και στον οριζόντιο ο χρόνος. Οι μπλέ στήλες είναι η κατάσταση αναφοράς (unseeded), και οι κόκκινες με η κατάσταση με σπορά AgI.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο –Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε μεθοδολογία για την προσομοίωση τεχνικών τροποποίησης καιρού. Στα πλαίσια του ατμοσφαιρικού μοντέλου RAMS/ICLAMS αναπτύχθηκαν κατάλληλοι αλγόριθμοι για την περιγραφή της απελευθέρωσης πυρήνων συμπύκνωσης και παγοποίησης από αεροσκάφος σε διάφορα ύψη μέσα σε ένα νεφικό σύστημα. Τα πρώτα αποτελέσματα καταδεικνύουν σημαντική συσχέτιση των διαφόρων χαρακτηριστικών των σωματιδίων με τον παραγόμενο υετό. Η συσχέτιση αυτή είναι ιδιαίτερα εμφανής κατά την ώριμη “mature” φάση της ανάπτυξης του νέφους. Συγκεκριμένα μερικά σημαντικά σημεία που παρατηρήθηκαν είναι τα εξής:

- ✓ Οι χρόνοι απόκρισης του συστήματος κυμαίνονται από τα 30’-90’ με διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με την περίπτωση.
- ✓ Η επιλογή του ύψους είναι κρίσιμη παράμετρος και μπορεί να δώσει διαφορετικά αποτελέσματα για κάθε νεφικό σχηματισμό – επιλέγεται κατά περίπτωση.
- ✓ Η τύρβη στο νεφικό σχηματισμό είναι εξίσου κρίσιμη παράμετρος και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την αποφυγή φαινομένων όπως το overseeding.

Περισσότερες προσομοιώσεις για πραγματικές καταιγίδες αναμένεται να βελτιώσουν σημαντικά τη γνώση μας σχετικά με τους παραπάνω μικροφυσικούς μηχανισμούς. Επιπλέον, η παρούσα μεθοδολογία μπορεί να θεωρηθεί ως μια βάση για την ανάπτυξη πιο λεπτομερών μοντέλων τροποποίησης καιρού σε συνδυασμό με πειράματα πεδίου ή επιχειρησιακές εφαρμογές.

- Astitha, M., Kallos, G., Spyrou, C., O'Hirok, W., Lelieveld, J., and Denier van der Gon, H. A. C.: *Chemically aged and mixed aerosols over the Central Atlantic Ocean – potential impacts*, Atmos. Chem. Phys. 10, 5797-5822, 1020 doi:10.5194/acp-10-5797, 2010.
- Astitha, M. and Kallos, G.: *Gas-phase and aerosol chemistry interactions in South Europe and the Mediterranean Region*, Env. Fl. Mech., doi:10.1007/s10652-008-91107., 2008..
- Andreae, M. O. and Rosenfeld, D.: *Aerosol-cloud-precipitation interactions, Part 1, The nature and sources of cloud-active aerosols*, Earth Science Reviews, 89, 13–41, 2008.
- Albers, S. C.: The LAPS wind analysis, Weather and Forecasting, 10, 342-352., 1995.
- Arlin B. Super and James A. Heimbach: *Propane cloud seeding experiment overview: Wasatch Plateau, Utah, During Winter of 2003/04*, 2005.
- Barahona, D. and Nenes, A. : *Parameterization of cloud droplet formation in large scale models: Including effects of entrainment*, J. Geoph. Res., **112**, 2007.
- Battan, L. J.: *Radar Observation of the Atmosphere*. University of Chicago Press. 1973
- Charlson, R. J., Schwartz, S. E., Hales, J. M., Cess, R. D., Coakley, J. A., Hansen J. E. and D. J. Hofmann: *Climate forcing by anthropogenic aerosols*, Science, 255, 423-430, 1992.
- Dennis, A.S.: *Weather Modification by Cloud Seeding*. Academic Press.
- Cotton William R.: *Basic Cloud Seeding Concepts*, Colorado State University, 2007
- Jirak, Israel L., William R. Cotton,: *Effect of Air Pollution on Precipitation along the Front Range of the Rocky Mountains. J. Appl. Meteor. Climatol.*, **45**, 236–245. 2006
- Chung, S. H., and Seinfeld, J. H.: *Global distribution and climate forcing of carbonaceous aerosols*, J. Geophys. Res., 107(D19), 4407, doi:10.1029/2001JD001397, 2002.
- R.L. Walko, W.R. Cotton, M.P. Meyers, J.Y. Harrington: *New RAMS cloud microphysics parameterization Part I: The single-moment scheme*. Atm. Res., **38**, 29-62, 1995.
- Meyers M.P., Walko R.L., Harrington J.Y., Cotton W.R.: *New RAMS cloud microphysics parameterization Part II: The two-moment scheme*. Atm. Res., **45**, 3-39, 1997.
- Dockery, D. W. and Pope, C. A.: *Acute respiratory effects of particulate air pollution*, Annu. Rev. Publ. Health, 15, 107–132, 1994.
- DeMott, P. J., Sassen, K., Poellet, M. R., Baumgardner, D., Rogers, D. C., Brooks, S. D., Prenni, A. J. and Kreidenweis, S. M.: *African dust aerosols as atmospheric ice nuclei*, Geophys. Res. Lett, 30.1732, doi:10.1029/2003GL017410, 2003.

- Fountoukis, C. and Nenes, A.: *Continued Development of a Cloud Droplet Formation Parameterization for Global Climate Models*, J. Geophys. Res., 110, D11212, 2005.
- Gong, S. L., Barrie, L. A. and Lazare, M.: *Canadian Aerosol Module (CAM): a size-segregated simulation of atmospheric aerosol processes for climate and air quality models. 2. Global sea-salt aerosol and its budgets*, Journal of Geophysical Research 107, D24, 4779, 2002
- Herut, B., Collier, R., and Krom, M.D.: *The role of dust in supplying nitrogen and phosphorus to the Southeast Mediterranean*, Limnology and Oceanography 47 , pp. 870–878, 2002.
- IPCC, *Changes in atmospheric constituents and radiative forcing: Climate change: the physical science basis*, Cambridge University Press, New York, USA, and Cambridge, UK, 2007.
- Jacobson, M. Z.: *Global direct radiative forcing due to multicomponent anthropogenic and natural aerosols*, J. Geophys. Res., 106, 1551–1568, 2001.
- Kallos, G., Astitha, M., Katsafados, P. and Spyrou, C.: *Long-Range Transport of Anthropogenically and Naturally Produced particulate matter in the Mediterranean and North Atlantic: Current State of Knowledge*, J. of Applied Meteorology and Climatology 46, (8): 1230-1251. doi 10.1175/JAM2530.1, 2007.
- Kallos, G., Papadopoulos, A., Katsafados, P. Nickovic, S.: *Trans-Atlantic Saharan dust transport: Model simulation and results*, J. Geophysical Research, 111, D09204, doi: 10.1029/2005JD006207, 2006.
- Karyampudi, V. M., Palm, S. P., Reagen, J. A., Fang, H., Grant, W. B., Hoff, R. M., Moulin, C., Pierce, H. F., Torres, O., Browell, E. V. and Melfi, S. H.: *Validation of the Saharan dust plume conceptual model using lidar, Meteosat, and ECMWF data*, B. Am. Meteor. Soc., 80, 1045–1075, 1999.
- Karyampudi, V. M.: *A detailed synoptic-scale study of the structure, dynamics, and radiative effects of the Saharan air layer over the eastern tropical Atlantic during GARP Atlantic Tropical Experiment*, M. S. thesis, Department of Meteorology, The Pennsylvania State University, 136 pp., 1979.
- J. Kushta, G. Kallos, M. Astitha, S. Solomos, C. Spyrou, C. Mitsakou, J. Lelieveld: *Impact of natural aerosols on atmospheric radiation and consequent feedbacks with the meteorological and photochemical*

- state of the atmosphere*, doi: 10.1002/2013JD020714
- Lau, K. M., Kim, K. M., Sud, Y. C., and Walker, G. K.: *A GCM study of the response of the atmospheric water cycle of West Africa and the Atlantic to Saharan dust radiative forcing*, *Ann.Geophys.*, 27, 4023-4037,doi:10.51941 Angeo-27-4023-2009, 2009.
- Lau, K. M., Kim, M. K. and Kim, K. M.: *Aerosol induced anomalies in the Asian summer monsoon: The role of the Tibetan Plateau*. *Climate Dynamics*, 26 (7-8), 855-864, doi:10.1007/s00382-0 06-0114-z.,2006.
- Lohmann, U., and Feichter, J.: *Global indirect aerosol effects: A review*, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 715–737, 2005.
- Levin, Z. and Cotton, W. R.: *Aerosol Pollution Impact on Precipitation-A Scientific Review*, Springer,2009.
- Levin, Z., Ganor, E. and Gladstein, V.: *The effects of desert particles coated with sulfate on rain formation in the eastern Mediterranean*, *J. Appl. Meteorol.*, 35, 1511-1523, 1996.
- Mahowad, N., Jickells, T. D. , Baker, A. R., Artaxo, P., Benitez-Nelson, C. R., Bergametti, G., Bond, T. C., Chen,Y., Cohen, D. D., Herut, B., Kubilay, N., Losno, R., Maenhaut, C. L. W., McGee, K. A., Okin, G. S., Siefert, R. L. and Tsukuda, S.: *Global distribution of atmospheric phosphorus sources, concentrations and deposition rates, and anthropogenic impacts*, *Global Biogeochem. Cy.*, 22, GB4026, doi:10.1029/2008GB003240, 2008.
- Meskhidze, N. and Nenes, A.: *Phytoplankton and Cloudiness in the Southern Ocean*, *Science*, 314, 1419–1423,2006.
- Meskhidze, N., Chameides, W. L., and Nenes, A.: *Dust and pollution: A recipe for enhanced ocean fertilization*, *J.Geophys. Res.*, 110, D03301, doi:10.1029/2004JD005082, 2005.
- Mitsakou, C., Kallos, G., Papantoniou, N., Spyrou, C., Solomos, S., Astitha, M., Housiadas, C.: *Saharan dust levels in Greece and received inhalation doses*, *Atmos. Chem. Phys. Disc.*, 8, 7181-7192, 2008.
- Marshall, J. S., W. Mc K. Palmer, 1948: *The Distribution Of Raindrops With Size*. *J. Meteor.*, 5, 165–166
- Myhre, G., Grini, A., Haywood, J. M., Stordal, F., Chatenet, B., Tanr, D., Sundet, J. K. and Isaksen, I. S. A.:*Modelling the radiative impact of mineral dust aerosol during the Saharan Dust Experiment*

- (*SHADE*)campaign, J Geophys Res, 108 (D18), 8579, doi:10.1029/2002JD002566, 2003b.
- Pierce, J. R. and Adams, P. J.: *Global evaluation of CCN formation by direct emission of sea salt and growth of ultrafine sea salt*, J. Geophys. Res., 111, D06203, doi:10.1029/2005JD006186, 2006.
- Prospero, J. M., Blades, E., Mathison, G. and Naidu, R.: *Interhemispheric transport of viable fungi and bacteria from Africa to the Caribbean with soil dust*, Aerobiologia 21 (1), pp. 1–19, 2005.
- Pruppacher, H. R. and Klett, J. D.: *Microphysics of Clouds and Precipitation, Second Revised and Enlarged Edition with an Introduction to Cloud Chemistry and Cloud Electricity*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 954 pp, 1997.
- Querol, X., Pey, J., Pandolfi, M., Alastuey, A., Cusack, M., Perez, N., Moreno, T., Viana, M., Mihalopoulos, N., Kallos, G., Kleanthous, S.: *African dust contributions to mean ambient PM10 mass-levels across the Mediterranean Basin Atmospheric Environment*, Volume 43, Issue 28, Pages 4266–4277, 2009.
- Ramanathan V. Muvva, V., Ramana, G., Roberts, G., Kim, D., Corrigan, C., Chung, C., and Winker, D., *Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption*, Nature, 448, 575–578, 2007.
- S. Solomos, G. Kallos, J. Kushta, M. Astitha, C. Tremback, A. Nenes, and Z. Levin: *An integrated modeling study on the effects of mineral dust and sea salt particles on clouds and precipitation*, Atmos. Chem. Phys., 11, 873–892, 2011, doi:10.5194/acp-11-873-2011
- Sassen, K., DeMott, P. J., Prospero, J. M. and Poellet, M. R.: *Saharan dust storms and indirect aerosol effects on clouds: CRYSTAL-FACE results*, Geophys. Res. Lett, 30.1633, doi:10.1029/2003GL017371, 2003.
- Seinfeld J. H. and Pandis S. N.: *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, .
- Wiley, Sons, Inc., New York, 1998. Sun, D., Lau, K. M., Kafatos M., Boybei, Z., Leptoukh, G., and Yang, C.: *A numerical simulation of the impacts of African dust aerosols and associated Saharan air layer on Atlantic tropical cyclone development*, J. Climate, 22, 6230–6250, doi:10.1175/2009JCLI2738.1., 2009
- Teller, A. and Levin, Z.: *The effects of aerosols on precipitation and dimensions of subtropical clouds; a sensitivity study using a numerical cloud model*, Atmos. Chem. And Phys. 6, 67–80, 2006

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Twomey, S.: *The influence of pollution on the short-wave albedo of clouds*, J. Atmos. Sci. 34, 1149-1 152, 1977.
- Wurzler, S., Reisin, T. G. and Levin, Z.: *Modification of mineral dust particles by cloud processing and subsequent effects on drop size distributions*.
- Wallace, J.M., and Hobbs, P.V.: *Atmospheric Science, Academic, 1977*.
- Wallace, John M. and Peter V. Hobbs: *Atmospheric Science, 2006*.
- Wegener, Alfred : *Thermodynamik der Atmosphäre [Thermodynamics of the Atmosphere] (in German)*. Leipzig: Verlag Von Johann Ambrosius Barth, 1911.
- Zender, C.S., Miller, R. and Tegen, I: *Quantifying Mineral Dust Mass Budgets: Terminology, Constraints, and Current Estimates*, *Eos Trans. AGU*, 85(48), 509-512, doi:10.1029/2004EO480002, 2004.