

## ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΡΙΝΗΣ ΚΑΤΑΙΓΙΔΑΣ ΣΤΗ Β. ΕΛΛΑΔΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΝΟΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Μαυροματιδής Η.<sup>1</sup>, Κάλλος Γ.<sup>1</sup>, Κατσαφάδος Π.<sup>2</sup>, Αστήθα Μ.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Φυσικής,  
Τομέας Φυσικής Εφαρμογών, Πανεπιστημιούπολη, Κτίριο Φυσικής-5,  
τηλ.: 210-7276832, 210-7276923, fax: 210-9631967, imavr@mg.uoa.gr

<sup>2</sup>Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωγραφίας, Ελ. Βενιζέλου 70, Αθήνα, 17671.

### Περίληψη

Στην παρούσα εργασία, γίνεται προσπάθεια να εκτιμηθούν οι διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη και την ένταση ισχυρών καταιγίδων από σύγκλιση αερίων μαζών στη Β. Ελλάδα. Η περίπτωση μελέτης (case study) αφορά καταιγιδοφόρο δραστηριότητα, που εξελίχθηκε στην πεδιάδα της Κεντρικής Μακεδονίας στις 21 Ιουνίου 1999. Με το αριθμητικό ατμοσφαιρικό μοντέλο περιορισμένης περιοχής RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) προσομοιώθηκαν οι συνθήκες που επέδρασαν στην ανάπτυξη της δραστηριότητας στην περιοχή, αλλά και οι μικροφυσικές διεργασίες κατά την διάρκεια των φαινομένων. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στις συνθήκες εμφάνισης χαλαζιού, που αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα για την ευρύτερη περιοχή. Από τη μελέτη προέκυψε ότι, εκτός από τη συνοπτική κατάσταση, ιδιαίτερα σημαντικός είναι και ο ρόλος του ανάγλυφου του εδάφους αλλά και των θερμοφυσικών συνθηκών του εδαφικού στρώματος, τα οποία επηρεάζουν τόσο την ανάπτυξη των καταιγίδων όσο και την ένταση και τις μέγιστες τιμές των φαινομένων. Κατά την διάρκεια της καταιγίδας, η εμφάνιση 'γλώσσας' ψυχρού αέρα (ρεύμα πυκνότητας) βοηθά στη δημιουργία των δευτερευόντων κυττάρων καταιγίδας και συντηρεί τα ήδη υπάρχοντα. Όσον αφορά στα μέγιστα των συγκεντρώσεων χαλαζιού μέσα στο καταιγιδοφόρο νέφος, αυτά συμπίπτουν χωροχρονικά με τις περιοχές στις οποίες εμφανίζει μέγιστα η τυρβώδης κινητική ενέργεια και εκεί όπου επικρατούν έντονες ανοδικές κινήσεις, ενώ αύξηση της ποσότητας των πρωτογενών μικρών παγοκρυστάλλων (pristine ice), κοντά στην τροπόπαυση, συνδέεται και με ανάλογη αύξηση στην ποσότητα των χαλαζοκόκκων.

### STUDY OF A SUMMER STORM IN NORTHERN GREECE WITH THE AID OF A REGIONAL ATMOSPHERIC MODELING SYSTEM

Mavromatidis E.<sup>1</sup>, Kallos G.<sup>1</sup>, Katsafados P.<sup>2</sup>, Astitha M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National and Kapodistrian University of Athens, School of Physics,  
Division of Applied Physics, University Campus, Bldg Phys-5,

tel.: 30-210-7276832, 30-210-7276923, fax: 30-210-9631967. E-mail: imavr@mg.uoa.gr

<sup>2</sup>Harokopio University of Athens, School of Geography, El. Venizelou 70, Athens, 17671.

### Abstract

In this work an effort is made to estimate the several factors that affect the development and intensity of strong convective storms in North Greece. The case study concerns a storm activity that developed in Central Macedonia during 21 June 1999. The RAMS modeling system was used to simulate the atmospheric conditions that influenced the phenomenon, as well as the microphysical processes during the storm. Emphasis is given to the production of hail, which is a serious problem for the area under consideration. The study showed that the summertime convective storms over the Greek Peninsula (especially over northern

Greece) are large-scale weather phenomena. However, the mesoscale phenomena and primarily those related to the physiographic characteristics of the area have an important role at the intensity and peaks of the convective activity. The density current, which is created from the downdrafts within a cell of the primary storm, is the fuss that triggers the secondary cells of the storm and conserve the primarily ones. The higher number concentration, within the convective cloud formation, has been calculated by the model at areas with high values of Turbulent Kinetic Energy (TKE). At the same areas the vertical component of the wind was also very high. Finally, the formation of large amounts of pristine ice at the top of the cloud formation usually precedes the development of larger hydrometeors (e.g. hail) within the middle levels of the cloud.

**Λέξεις κλειδιά:** Ατμοσφαιρικό Μοντέλο, θερινή καταιγίδα, μικροφυσική νεφών.

**Key words:** Atmospheric Model, summer thunderstorm, cloud microphysics.

## 1.Εισαγωγή

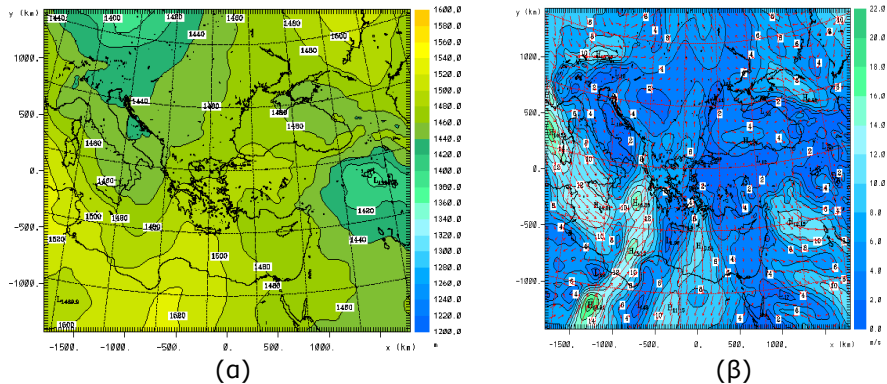
Τα τελευταία χρόνια, με σκοπό τη διερεύνηση των μηχανισμών που οδηγούν στην απότομη ενίσχυση βαρομετρικών χαμηλών σε μέσα γεωγραφικά πλάτη, πολλοί ερευνητές προσομοίωσαν με αριθμητικά μοντέλα χαρακτηριστικές περιπτώσεις τέτοιων καταιγίδων (μεταξύ άλλων Kallos and Segal, 1991; Krichak et al., 2000). Από τις παραπάνω μελέτες φαίνεται ότι τα συστήματα αυτά επηρεάζονται από την επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας, την αισθητή και τη λανθάνουσα ροή θερμότητας, καθώς και από τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται και οι θερινές καταιγίδες στον Ελλαδικό χώρο, οι οποίες αναπτύσσονται κατά μήκος μιας γραμμής σύγκλισης που ακολουθεί τον κύριο άξονα της Ελληνικής Χερσονήσου. Η εμφάνιση των καταιγίδων της θερμής περιόδου του έτους, ιδιαίτερα στον βορειοελλαδικό χώρο, έχει μελετηθεί από διάφορους ερευνητές (Φλόκα και Καρακώστας, 1988 και Kotroni et al., 1997 μεταξύ άλλων). Στις μελέτες αυτές είτε διερευνήθηκαν οι κύριοι παράγοντες (συνοπτικής και μέσης κλίμακας) που συνέβαλαν στην εκδήλωση και ισχυροποίηση του φαινομένου, είτε αναπτύχθηκαν προγνωστικοί δείκτες και δείκτες αστάθειας. Στην παρούσα μελέτη γίνεται μία πρώτη προσπάθεια - με την εφαρμογή ενός ατμοσφαιρικού μοντέλου - να μελετηθούν επιπλέον οι παράμετροι και οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μικροφυσική δομή των νεφικών συστημάτων, τα οποία προκαλούν τέτοιες ακραίες καταιγίδες σύγκλισης.

## 2.Περίπτωση Μελέτης – Συνοπτικές Συνθήκες

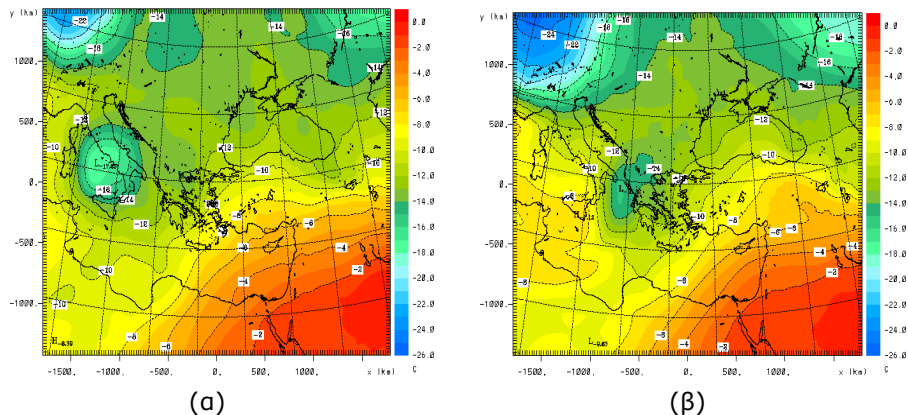
Η περίπτωση μελέτης αφορά καταιγιδόφορο δραστηριότητα με πτώση χαλαζιού στις 21 Ιουνίου 1999 (6:00-19:00 UTC) στην πεδιάδα της Κεντρικής Μακεδονίας. Ο συνοπτικός τύπος καιρού που επικράτησε κατά την ημέρα αυτή (Νοτιοδυτικό ρεύμα), θεωρείται ο πιο «παραγωγικός» σε χαλάζι και ο δεύτερος σε συχνότητα εμφάνισης χαλαζιού (Φλόκα, 1993). Σύμφωνα με τα στοιχεία που προέρχονται από δεδομένα ανάλυσης του ECMWF, η Ιταλική Χερσονήσος καταλαμβάνονταν στη μέση τροπόσφαιρα από μία trough με άξονα δυτικά της Ιταλίας, η οποία ενισχύθηκε και προχώρησε ελαφρώς ανατολικά κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτή η συνοπτική κατάσταση διαμόρφωσε ένα ΝΔ ρεύμα αέρα πάνω από την Ελλάδα στη μέση και κατώτερη τροπόσφαιρα (1). Το ρεύμα αυτό μετέφερε θερμές και υγρές αέρια μάζες δια μέσου της Ελληνικής Χερσονήσου από το Ιόνιο Πέλαγος προς τη Βόρεια χώρα (Δεν παρουσιάζεται εδώ).

Παράλληλα, στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας αναπτύχθηκε ένα δυτικό ρεύμα ψυχρού αέρα πάνω από τον Ελληνικό χώρο. Αυτές οι ψυχρές αέρια μάζες μετατοπίστηκαν προς την Ήπειρο και έφθασαν κατά τις 12:00 UTC μέχρι την κεντρική Μακεδονία (Σχήμα 2). Η μεταφορά θερμών και υγρών αερίων μαζών στα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας από το ΝΔ ρεύμα αέρα, σε συνδυασμό με την μεταφορά ψυχρών αερίων μαζών από Δυτικές διευθύνσεις στα ψηλότερα στρώματα της τροπόσφαιρας, ευνόησε τη δημιουργία ασταθών

συνθηκών κατά τις επόμενες ώρες. Η σύγκλιση των θερμών αερίων μαζών κατά μήκος της οροσειράς της Ελληνικής Χερσονήσου (ενισχυμένη και από μηχανική ανύψωση λόγω των ορεινών όγκων) είχε σαν συνέπεια την ανάπτυξη ανοδικών κινήσεων που οδήγησαν στη γρήγορη συμπύκνωση των υδρατμών και στο σχηματισμό συμπλεγμάτων καταιγιδοφόρων κυττάρων. Η δραστηριότητα εξελίχθηκε σταδιακά πάνω από τη βόρεια Ελλάδα και άρχισε να φθίνει κατά τις βραδινές ώρες.



Σχήμα 1. Οριζόντια τομή, στα 850 hPa, των πεδίων: α) γεωδυναμικό ύψος στις 06:00 UTC και β) πεδίο ανέμου στις 06:00 UTC, στις 21 Ιουνίου 1999.



Σχήμα 2. Οριζόντια τομή της θερμοκρασία στα 500 hPa α) στις 00:00 UTC, και β) στις 12:00 UTC, στις 21 Ιουνίου 1999.

### 3. Περιγραφή του Ατμοσφαιρικού Μοντέλου

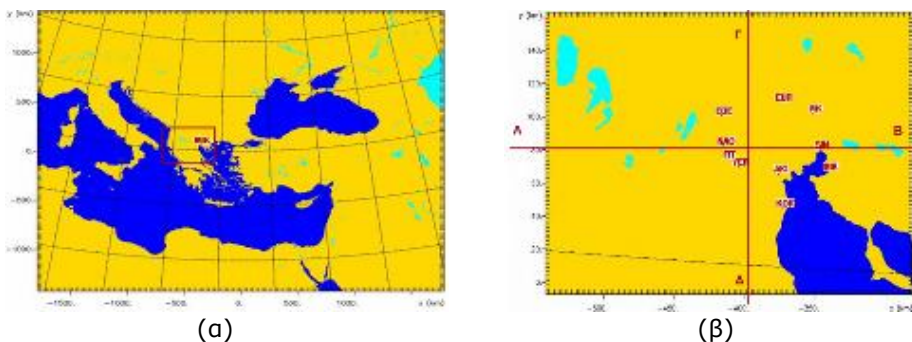
Το αριθμητικό μοντέλο RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) αναπτύχθηκε αρχικά στο Colorado State University σε συνεργασία με την Aster Division of Mission Research Inc. (<http://www.atmet.com>) για ερευνητικές εφαρμογές (Pielke et al., 1992). Χρησιμοποιείται κυρίως για προσομοιώσεις ατμοσφαιρικών φαινομένων μέσης κλίμακας (οριζόντια κλίμακα από 2 km έως 2000 km). Μπορεί να περιγράψει διάφορα ατμοσφαιρικά φαινόμενα συμπεριλαμβανομένων και των μικροφυσικών διαδικασιών στα νέφη. Το σχήμα μικροφυσικής του μοντέλου περιλαμβάνει κατηγορίες υδρομετεώρων σε στερεή, υγρή και μεικτή φάση. Συγκεκριμένα, η υγρή φάση περιλαμβάνει δύο κατηγορίες: τα νεφροσταγονίδια

(cloud) και τις υδροσταγόνες (rain), που μπορεί να βρίσκονται και σε κατάσταση υπέρτυξης. Τελειώς παγωμένα υδρομετέωρα είναι οι κρύσταλλοι χιονιού (snow), τα συσσωματώματα παγοκρυστάλλων (aggregates) και οι πρωτογενείς μικροί παγοκρύσταλλοι (pristine ice). Μεικτής φάσης είναι τα μορφώματα πάγου (graupel) και οι χαλαζόκοκκοι (hail).

Το σχήμα περιλαμβάνει προγνωστικές εξισώσεις με τις οποίες υπολογίζονται η αναλογία μίγματος (mixing ratio) και ο αριθμός συγκέντρωσης (number concentration (Nt)) των διαφόρων τύπων υδρομετεώρων. Θεωρείται ότι τα υδρομετέωρα σε κάθε κατηγορία κατανέμονται σύμφωνα με μία γενικευμένη κατανομή γάμα ( $\gamma$ ) (Verlidge et al. 1990). Η μορφή της κατανομής καθορίζεται από την παράμετρο  $\nu$ , που μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή μεγαλύτερη ή ίση με τη μονάδα. Αυτή η παράμετρος μορφής ελέγχει στην κατανομή την ποσότητα των μικρότερων υδρομετεώρων σε σχέση με τα μεγαλύτερα. Όταν η παράμετρος μορφής λειφθεί ίση με τη μονάδα, θεωρείται ότι το μέγεθος των υδρομετεώρων ακολουθεί την εκθετική κατανομή (Marshall-Palmer).

#### 4. Σχεδιασμός των προσομοιώσεων και μεθοδολογία

Έγινε μία σειρά από προσομοιώσεις με διάρκεια 48 ώρες, οι οποίες ξεκίνησαν στις 00:00 UTC της 20ης Ιουνίου. Χρησιμοποιήθηκαν τρία επάλληλα πλέγματα σε πολικές στερεογραφικές συντεταγμένες που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3. Η οριζόντια χωρική διακριτικότητα των πλεγμάτων ήταν 24 km για το πρώτο, 6 km για το δεύτερο και 2 km για το τρίτο πλέγμα. Η περιγραφή της κατακόρυφης δομής της ατμόσφαιρας έγινε με 49 επίπεδα σε κατακόρυφο σύστημα συντεταγμένων σΖ.



Σχήμα.3. α) 1ο και 2ο πλέγμα των περιοχών ολοκλήρωσης του μοντέλου και β) η περιοχή που καλύπτεται από το τρίτο πλέγμα.

Σαν αρχικές και πλευρικές συνθήκες του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα προερχόμενα από το ECMWF (European Center of Medium Range Weather Forecasts), με οριζόντια ανάλυση 0.5ο για κάθε 6 ώρες. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν, ανά 6ωρο, οι διαθέσιμες ραδιοβολίσεις και παρατηρήσεις σταθμών εδάφους από το ίδιο κέντρο. Η τοπογραφία και τα δεδομένα χρήσης γης με οριζόντια ανάλυση 30'' προέρχονται από το USGS (United States Geological Survey). Πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε κυψελίδα πλέγματος χωρίσθηκε σε 5 υποπλεγματικά τμήματα (με δικό του τύπο βλάστησης το καθένα), για να γίνει όσο το δυνατόν πιο ακριβής η αναπαράσταση της κάλυψης του εδάφους, ενώ για να αναπαρασταθεί το εδαφικό στρώμα στο οποίο περιγράφονται οι μεταβολές της εδαφικής θερμοκρασίας και υγρασίας, χρησιμοποιήθηκαν μέσα στο έδαφος 10 επίπεδα που έφθαναν σε βάθος τα 2 m.

Για να διερευνηθεί κατά πόσο επιδρά η κατανομή μεγέθους των υδρομετεώρων στην ποσότητα του νερού που φθάνει στο έδαφος, έγιναν προσομοιώσεις με διαφορετικές τιμές του παραμέτρου μορφής ( $\nu=1$  ή  $\nu=2$ ), ενώ για να διερευνηθεί η επίδραση των ιδιοτήτων του εδάφους έγιναν προσομοιώσεις με διαφορετικές αρχικές τιμές στις θερμοφυσικές

παραμέτρους του εδαφικού στρώματος. Σε όλες τις προσομοιώσεις το μοντέλο αναπαρήγαγε με σχετική επιτυχία την χωροχρονική εξέλιξη των φαινομένων αλλά και την ποσότητα της βροχής. Όμως πιο επιτυχημένες θεωρήθηκαν αυτές που αναπαρήγαγαν επιτυχώς και την χαλαζόπτωση. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στις οποίες η παράμετρος μορφής της γάμα κατανομής ( $\nu$ ) θεωρήθηκε ίση με 1, κατέδειξαν θερμοφυσικά χαρακτηριστικά εδάφους, τα οποία εφαρμόστηκαν κατά τη διαμόρφωση νέας προσομοίωσης με τιμή για την παράμετρο μορφής ( $\nu$ ) ίσης με 2, η οποία θεωρήθηκε και η κύρια προσομοίωση.

## 5. Αποτελέσματα των προσομοιώσεων

### 5.1 Αποτελέσματα των προσομοιώσεων με $\nu=1$ (single-modal)

Έγιναν τρεις προσομοιώσεις (ST1/normal, ST2/wet και ST3/dry), στις οποίες η παράμετρος μορφής ( $\nu$ ) θεωρήθηκε ίση με τη μονάδα. Οι διαφορές τους είναι ότι στην ST2 το έδαφος θεωρήθηκε πολύ υγρό, στην ST1 αρκετά υγρό, ενώ στην ST3 το έδαφος θεωρήθηκε σχετικά ξηρό. Από τις τρεις προσομοιώσεις λιγότερο επιτυχημένη θεωρήθηκε η προσομοίωση ST1. Οι ποσότητες του χαλαζιού, που έφθασαν στο έδαφος ήταν εξαιρετικά μικρές και σε περιορισμένη έκταση. Παρόλα αυτά η γενικότερη εξέλιξη της δραστηριότητας αναπαράχθηκε αρκετά ικανοποιητικά. Οι επόμενες δύο προσομοιώσεις (ST2 και ST3) έδωσαν καλύτερα αποτελέσματα. Από το μοντέλο εκτιμήθηκαν αρκετές ποσότητες χαλαζιού στην ευρύτερη περιοχή αλλά και στην περιοχή ενδιαφέροντος. Γενικά και στις δύο προσομοιώσεις τα κέντρα της δραστηριότητας ήταν τα ίδια περίπου με μικρές μόνο διαφοροποιήσεις. Εκείνο που ξεχωρίζει τις δύο προσομοιώσεις είναι το γεγονός ότι στην προσομοίωση ST2 έφθασαν αθροιστικά στο έδαφος μεγαλύτερες ποσότητες νερού και σε μεγαλύτερη έκταση, συγκριτικά με τα αντίστοιχα μεγέθη που υπολογίστηκαν στην προσομοίωση ST3. Όμως, στην ST3 η ένταση των φαινομένων ήταν μεγαλύτερη.

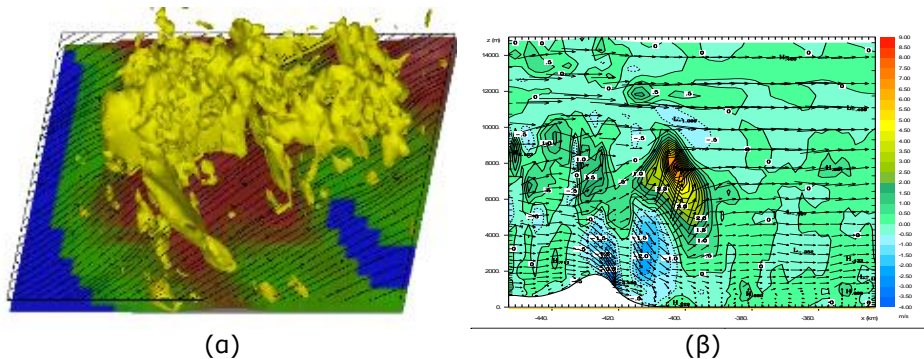
Συνοψίζοντας, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι τα καλύτερα αποτελέσματα των δύο άλλων προσομοιώσεων σε σχέση με την ST1 οφείλονται στο πιο θερμό έδαφος (στις προσομοιώσεις ST2 και ST3), αφού το έδαφος τροφοδοτώντας με θερμότητα τον υπερκείμενο αέρα ενισχύει τα ανοδικά ρεύματα. Το ξηρό και θερμό έδαφος στην προσομοίωση ST3 ενίσχυσε κατά πολύ την ανοδική μεταφορά, με αποτέλεσμα οι αέριες μάζες να φθάνουν ψηλότερα, όπου επικράτησαν χαμηλότερες θερμοκρασίες. Δεν μπορούσε όμως να τροφοδοτήσει με υγρασία τον αέρα, γεγονός που συμβαίνει στην προσομοίωση ST2, στην οποία ενισχύθηκαν μεν λιγότερο τα ανοδικά ρεύματα (μικρότερης έντασης φαινόμενα) αλλά εμπλουτίστηκε με υγρασία ο υπερκείμενος αέρας. Έτσι οι συνολικές ποσότητες νερού που έφθασαν στο έδαφος ήταν αρκετά μεγαλύτερες.

### 5.2 Αποτελέσματα της κύριας προσομοίωσης ( $\nu=2$ , bi-modal)

Η συγκεκριμένη προσομοίωση, της οποίας τα αποτελέσματα παρουσιάζονται πιο αναλυτικά, θεωρήθηκε η κύρια προσομοίωση. Το έδαφος θεωρήθηκε σχετικά υγρό, όπως και στην ST1, καθώς εντοπίστηκε καταγίδοφόρος δράση στην περιοχή, 2-3 ημέρες πριν από την περίπτωση μελέτης, ενώ χρησιμοποιήθηκε σαν αρχική κατατομή θερμοκρασίας στα υπεδάφια στρώματα η ίδια με αυτήν της προσομοίωσης ST2. Συγκεκριμένα τα υπεδάφια στρώματα θεωρήθηκαν λίγο θερμότερα από το πρώτο ατμοσφαιρικό επίπεδο. Από τις μικροφυσικές παραμέτρους, το χαλάζι είναι αυτό που δημιουργεί τα προβλήματα στις καλλιέργειες κατά τη διάρκεια των θερινών καταιγίδων στην βόρεια Ελλάδα και ως εκ τούτου δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στη διερεύνηση της ανάπτυξής του. Η παράμετρος μορφής των υδρομετεώρων ( $\nu$ ) θεωρήθηκε ίση με 2, διότι, όταν θεωρηθεί ίση με τη μονάδα (Marshall-Palmer), ευνοείται η επικράτηση σωματιδίων νέφους με μικρές διαμέτρους και όχι η ανάπτυξη μεγαλύτερων σωματιδίων, όπως είναι οι χαλαζόκοκκοι.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης διαπιστώνεται η ανάπτυξη έντονων ανοδικών κινήσεων στην περιοχή της Ηπείρου και της Αλβανίας, που οφείλονται στην εκτιμώμενη αστάθεια της ατμόσφαιρας. Η αλληλεπίδραση των θερμών και υγρών

αερίων μαζών με το ανάγλυφο της περιοχής και με τις ψυχρότερες ηπειρωτικές αέριες μάζες διατάραξε τη ροή του αέρα και οδήγησε σε σύγκλιση των αερίων μαζών κατά μήκος της κορυφογραμμής της Ελληνικής Χερσονήσου. Αυτή η κατάσταση είχε σαν αποτέλεσμα τη γρήγορη συμπύκνωση των υδρατμών και το σχηματισμό συμπλεγμάτων καταιγιδοφόρων κυττάρων, τα οποία κατά τη διάρκεια της ημέρας μεταφέρθηκαν μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος. Κατά την διάρκεια των φαινομένων εκτιμήθηκαν από το μοντέλο ανοδικές ταχύτητες μέχρι και 8 m/s σε ύψη μεταξύ 5 και 6 km (Σχήμα 4), ενώ από τους πιλότους του ΕΛΓΑ (Οργανισμός Ελληνικών Γεωργικών Ασφαλίσεων) αναφέρθηκαν κατακόρυφες ταχύτητες περίπου 10 m/s (Σιούτας κ. α, 2000).



(α)

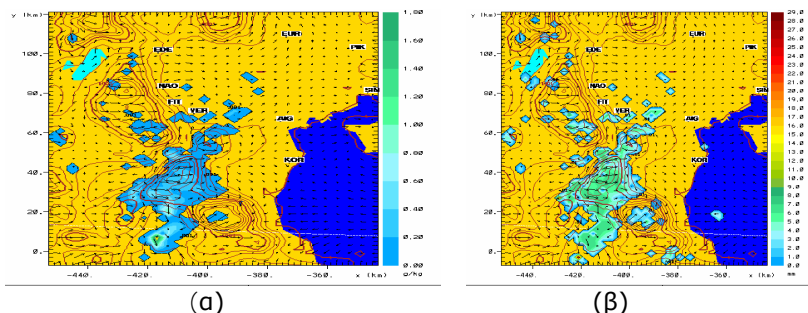
(β)

Σχήμα 4. Εκτίμηση συνθηκών της 21ης Ιουνίου 1999:

α) Οι τρισδιάστατες κίτρινες επιφάνειες απεικονίζουν τις ισοταχείς του 1 m/s των ανοδικών κινήσεων, ενώ οι ρευματογραμμές αναφέρονται στον οριζόντιο άνεμο στα 2000 m ύψος, στις 12:00 UTC και

β) Κατακόρυφη τομή του πεδίου της κατακόρυφης ροής του αέρα στις 9:55 UTC, κατά μήκος της γραμμής ΑΒ του Σχήματος 3β στην κατεύθυνση Ανατολή-Δύση μέσα στην πεδιάδα της Θεσσαλονίκης.

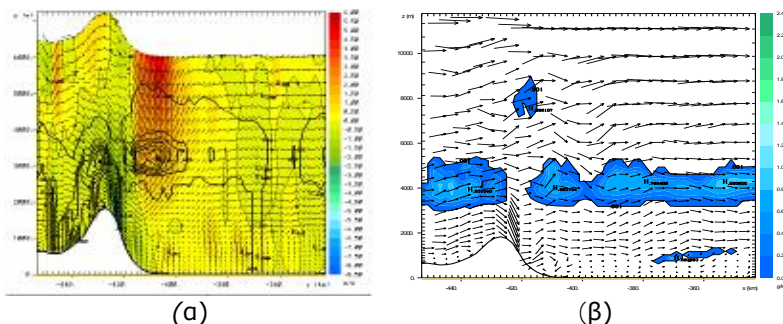
Τα πρώτα καταιγιδοφόρα κύτταρα αφού έδωσαν φαινόμενα κατά τις 09:00 UTC στο δυτικό και νότιο τμήμα της περιοχής ενδιαφέροντος, μεταφέρθηκαν στη συνέχεια μέσα στην πεδιάδα της Θεσσαλονίκης και ενισχύθηκαν, ενώ παράλληλα αναπτύχθηκαν και νέα θυγατρικά κύτταρα, που έδωσαν καταιγίδες μικρής διάρκειας. Συνολικά, κατά τη διάρκεια της ημέρας, προσομοιώθηκαν σημαντικές ποσότητες χαλαζιού σε όλα τα ορεινά της Δυτικής Μακεδονίας, των νομών Κιλκίς και Σερρών, καθώς και στον Όλυμπο. Μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος, παρατηρήθηκε μία σημαντική ζώνη χαλαζιού από τη Νάουσα μέχρι την περιοχή της Σίνδου, ενώ μικρότερες ποσότητες σημειώθηκαν στα νότια της περιοχής. Η ένταση της χαλαζόπτωσης, όπως εκτιμήθηκε από το μοντέλο, ήταν σχετικά μικρή στα πεδινά (5-10 mm/hr ισοδύναμα σε υγρό νερό), συγκριτικά με την ένταση των 100 mm/hr που έφθασε στους ορεινούς όγκους της γύρω περιοχής (Δεν παρουσιάζεται εδώ). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ανάλογοι ρυθμοί χαλαζόπτωσης είναι συνηθισμένοι σε έντονες χαλαζοκαταιγίδες (Federer and Waldvogel, 1975). Στην συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης, οι μέγιστες τιμές της αναλογίας μίγματος του χαλαζιού στα πεδινά υπολογίστηκαν σε μερικά δέκατα του γραμμαρίου ανά χιλιόγραμμο αέρα φθάνοντας μέχρι και τα 2.5 g/kg στις πλαγιές των γύρω ορεινών όγκων (Σχήμα 5α). Σε αντιστοιχία με την αναλογία μίγματος, η χαλαζόπτωση ήταν πυκνή στα γύρω ορεινά (μέχρι και 2000 σωματίδια/kg περίπου), ενώ μέσα στην πεδιάδα ο αριθμός συγκέντρωσης ήταν μερικές εκατοντάδες σωματίδια (Δεν παρουσιάζεται εδώ). Οι μεγάλες τιμές της αναλογίας μίγματος και αριθμού συγκέντρωσης, στα ορεινά, επιβεβαιώνονται και από την εξέταση των διαμέτρων των χαλαζοκόκκων. Οι μέγιστες διαμέτροι έφθασαν μέχρι και τα 30 mm, ενώ οι αντίστοιχες τιμές στα πεδινά έφθασαν κατά τόπους τα 8-10 mm (Σχήμα 5β).



Σχήμα 5. Οριζόντιες τομές στο πρώτο από την επιφάνεια επίπεδο του μοντέλου α) της αναλογίας μίγματος (g/kg) του χαλαζιού και β) των διαμέτρων των χαλαζοκόκκων(mm), σε ένα τμήμα του εσωτερικού πλέγματος της προσομοίωσης.

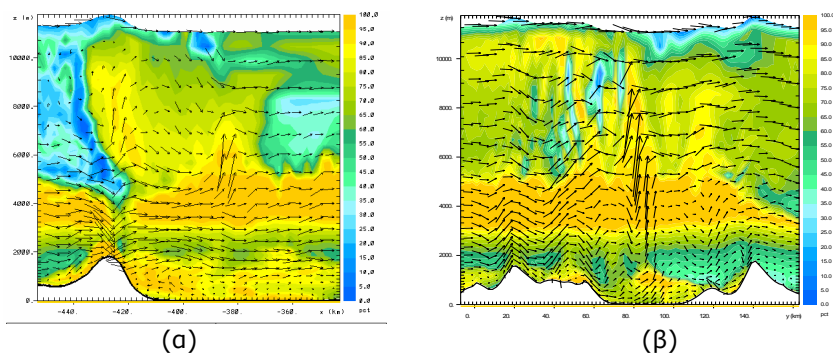
Για την λεπτομερέστερη μελέτη των μηχανισμών που ενίσχυσαν τη σύγκλιση και την ανάπτυξη των υδρομετεώρων στην περιοχή ενδιαφέροντος, δημιουργήθηκαν κατακόρυφες τομές μιας σειράς παραμέτρων κατά μήκος των αξόνων ΑΒ και ΓΔ (Σχήμα 3β). Επιλέχθηκαν οι άξονες αυτοί, διότι, κατά μήκος τους, αναπτύχθηκε έντονη δραστηριότητα. Ο άξονας ΑΒ διασχίζει την περιοχή με κατεύθυνση: Ανατολή – Δύση, τέμνοντας το Βέρμιο στο ύψος της Νάουσας. Αντίστοιχα, ο άξονας ΓΔ διασχίζει την περιοχή με κατεύθυνση Βορρά- Νότου.

Η μεγαλύτερη παραγωγή χαλαζιού εκτιμήθηκε από το μοντέλο εκεί όπου επικράτησαν έντονες ανοδικές κινήσεις. Αυτές είναι οι περιοχές που τροφοδοτούν το καταγιδοφόρο κύτταρο. Αντίθετα, πτώση χαλαζιού στο έδαφος παρατηρήθηκε σε περιοχές με έντονα καθοδικά ρεύματα (Σχήμα 6α). Αυτά τα καθοδικά ρεύματα μέσα στο κύτταρο της καταγίδας ενισχύονται και από την πτώση των υδρομετεώρων. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τα παγοσωματίδια μπορούν να αναπτυχθούν σε ένα καταγιδοφόρο κύτταρο και να φθάσουν σε μέγεθος κατακρημνισμάτων μέσα σε ζώνες, στις οποίες επικρατούν κατακόρυφες ταχύτητες μεταξύ 2 και 5 m/s (Yuter and Huzar, 1995). Στις ζώνες αυτές τα παγοσωματίδια αυξάνουν το μέγεθός τους με το μηχανισμό της εναπόθεσης υδρατμών, εκεί όπου τα ανοδικά ρεύματα είναι ικανά να τα συγκρατήσουν στον αέρα και να μην τα επιτρέψουν να κινηθούν καθοδικά λόγω της βαρύτητας (Pruppacher and Klett, 1997). Κάτι ανάλογο παρατηρείται και στην συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνεται ότι τα έντονα ανοδικά ρεύματα ανύψωσαν τα νεφοσταγονίδια σε ύψη μέχρι και 8 km, όπου το νερό βρίσκεται σε κατάσταση υπέρτηξης (Σχήμα 6β).



Σχήμα 6. Κατακόρυφες τομές κατά μήκος της γραμμής ΑΒ (Σχήμα 3β) α) της κατακόρυφης συνιστώσας του ανέμου (m/s) και της αναλογίας μίγματος του χαλαζιού (g/kg), στις 9:50 UTC. Ο χρωματισμός είναι ανάλογος της κατακόρυφης ταχύτητας του ανέμου, ενώ η αναλογία μίγματος του χαλαζιού αναπαριστάται με ισοπληθείς, β) της αναλογίας μίγματος (g/kg) των νεφοσταγονιδίων στις 10:05 UTC.

Από την ανάλυση κατακόρυφων τομών της σχετικής υγρασίας κατά μήκος του άξονα AB παρατηρείται ότι, κατά τη διάρκεια της ημέρας, διαταράχθηκε η ροή των αερίων μαζών στις υπήνεμες πλαγιές του Βερμίου με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν κύματα από την ορογραφία. Με αυτό τον τρόπο, ενισχύθηκαν τα ανοδικά ρεύματα και δόθηκε η δυνατότητα στις αέριες μάζες να φθάσουν στο επίπεδο ελεύθερης ανοδικής μεταφοράς (LFC). Έτσι, δημιουργήθηκαν νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης που έδωσαν τα φαινόμενα στην περιοχή. Με το πέρασμα της ημέρας, ο αέρας κινήθηκε, κατά διαστήματα, έντονα ανοδικά πάνω από το LFC και, έτσι, δημιουργήθηκαν καινούργια κύτταρα. Ιδιαίτερα χαρακτηριστική είναι η περίπτωση, που έδωσε τα φαινόμενα του μεσημεριού, όπου φαίνεται η ανάπτυξη του κυττάρου και οι έντονες ανοδικές κινήσεις του αέρα στο κέντρο του, ενώ είναι ορατός και ο σχηματισμός νέφους σε μορφή άκμονα στην κορυφή της σωρειτόμορφης ανάπτυξης. Γύρω στις 14:30 έχει πια μπει στο στάδιο της διάλυσης, καθώς παρατηρείται η εισχώρηση αέρα (entrainment) μέσα στο κύτταρο που είναι ξηρότερος από το περιβάλλον (Σχήμα 7α). Αντίστοιχη μελέτη έγινε και με τη βοήθεια μιας σειράς κατακόρυφων τομών κατά μήκος του άξονα ΓΔ. Παρατηρείται ότι η ροή των αερίων μαζών, που περνούν από τα Πιέρια όρη από νότιες-νοτιοδυτικές διευθύνσεις, διαταράσσεται πάνω από την κορυφή του ορεινού όγκου. Αυτή η διαταραχή των ρευματογραμμών δίνει την απαραίτητη ενέργεια για να ξεπεράσουν οι αέριες μάζες το επίπεδο της ελεύθερης ανοδικής μεταφοράς. Στο κέντρο της πεδιάδας, από την θέρμανση του εδάφους, οι ανοδικές κινήσεις είναι εξαιρετικά έντονες, με αποτέλεσμα οι αέριες μάζες να έχουν τη δυνατότητα να φθάσουν στο επίπεδο ελεύθερης ανοδικής μεταφοράς και να τροφοδοτήσουν το κύτταρο της καταιγίδας (Σχήμα 7β).



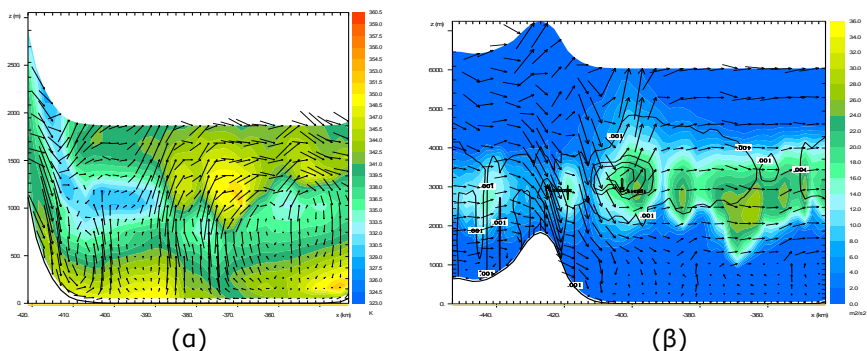
Σχήμα 7. Κατακόρυφες τομές της σχετικής υγρασίας (%) και βέλη ανέμου: α) κατά μήκος του άξονα AB στις 14:35 UTC και β) κατά μήκος του άξονα ΓΔ στις 9:55 UTC.

Σε κατακόρυφες τομές, κατά μήκος του άξονα AB, της ισοδύναμης δυναμικής θερμοκρασίας, καθώς εξελίσσεται η καταιγίδα στο όρος Βέρμιο, γίνεται εμφανής μία 'γλώσσα' ψυχρού αέρα στις υπήνεμες πλαγιές του ορεινού όγκου (Σχήμα 8α). Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό σαν ρεύμα πυκνότητας (density current). Είναι μία σφήνα ψυχρού αέρα, που τον κατεβάζει η ίδια η καταιγίδα και εισχωρεί κάτω από το θερμό αέρα της κοιλάδας, όπως, ακριβώς, συμβαίνει κατά τη μετακίνηση ενός ψυχρού μετώπου. Ο ρόλος του ρεύματος πυκνότητας και εδώ φαίνεται να είναι πολύ σημαντικός, διότι βοήθησε τόσο στην ανάπτυξη των δευτερογενών καταιγίδων όσο και στη συντήρησή τους. Παρατηρείται επίσης ότι οι μέγιστες συγκεντρώσεις χαλαζιού στην ατμόσφαιρα (Σχήμα 8β) συμπίπτουν χωροχρονικά με τις περιοχές στις οποίες παρουσιάζει μέγιστα η τυρβώδης κινητική ενέργεια, με την οποία απεικονίζεται το σπάσιμο των κυμάτων της ατμόσφαιρας από μεγάλα μήκη κύματος σε μικρότερα και η μετατόπιση της ενέργειας στα μικρότερα μήκη κύματος.

Συμπληρωματικά, από τη μελέτη της αναλογίας μίγματος των μικρών πρωτογενών παγοκρυστάλλων (pristine ice) διαπιστώνεται ότι αυτός ο τύπος σωματιδίων καταλαμβάνει το στρώμα της ατμόσφαιρας μεταξύ 4 και 10 km κατά το μεγαλύτερο διάστημα της ημέρας, με τις



μεγαλύτερες ποσότητες αυτών των υδρομετεώρων να βρίσκονται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας (~10 km), αφού η θερμοκρασία σχηματισμού τους είναι μικρότερη από αυτήν των άλλων σωματιδίων (Δεν παρουσιάζεται εδώ). Παρατηρείται από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης ότι αύξηση της ποσότητας των pristine ice, κοντά στην τροπόπαυση, συνδέεται και με ανάλογη αύξηση στην ποσότητα του χαλαζιού στην ατμόσφαιρα ή και με χαλαζόπτωση ακόμη στο έδαφος λίγο αργότερα. Το γεγονός αυτό προσιδιάζει με το μηχανισμό seeder-feeder, παρόλο που, συνήθως, ο μηχανισμός αυτός παρατηρείται κατά τις βραδινές ώρες.



Σχήμα 8. Κατακόρυφες τομές κατά μήκος του άξονα AB α) της ισοδύναμης δυναμικής θερμοκρασίας στις 9:50 UTC και β) της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ( $m^2/s^2$  – σε χρωματισμό) και της αναλογίας μίγματος χαλαζιού ( $g/kg$  – σε ισοπληθείς) στις 9:55 UTC.

## 6. Συμπεράσματα

Από τη μελέτη προέκυψε ότι η συνοπτική κατάσταση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των καταιγίδων στην συγκεκριμένη περιοχή. Εξ' ίσου όμως καθοριστικός είναι και ο ρόλος των φαινομένων μέσης κλίμακας και κυρίως αυτών που σχετίζονται με τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Αυτό συμβαίνει κυρίως όταν η μέση κλίμακα υπερκαλύπτει τη συνοπτική κατάσταση (αν είναι ασθενής) και τη γενική κυκλοφορία. Ειδικότερα βρέθηκε ότι οι συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας του εδάφους, στις πεδινές κυρίως περιοχές, επηρεάζουν τόσο τη χωροχρονική μεταβολή όσο και τα μέγιστα των ακραίων ή όχι καιρικών φαινομένων. Ξηρότερο έδαφος έχει σαν συνέπεια ισχυρότερη καταιγίδα κατά το ξεκίνημα και χαλαζόπτωση με μεγαλύτερη ένταση από τις περιπτώσεις με πιο υγρό έδαφος. Στην περίπτωση όμως αυτή η καταιγίδα εξασθενεί πιο γρήγορα λόγω της απουσίας ποσότητας υδρατμών ικανής να την τροφοδοτήσει με τις απαραίτητες ποσότητες νερού και λανθάνουσας θερμότητας. Εξίσου σημαντικός παράγοντας για τις ατμοσφαιρικές διαδικασίες είναι η διάταξη των ορεινών όγκων. Ο ρόλος τους είναι καθοριστικός για την δημιουργία των ζωνών σύγκλισης κατά μήκος της κορυφογραμμής της οροσειράς της Ελληνικής Χερσονήσου, οι οποίες δίνουν τα γωνστά έντονα καιρικά φαινόμενα, κυρίως στη Βόρεια Ελλάδα.

Κατά την διάρκεια της καταιγίδας από την προσομοίωση προέκυψαν τα εξής: α) η εμφάνιση του ρεύματος πυκνότητας (density current), εισχωρώντας κάτω από τον θερμό αέρα και εκτοπίζοντας τις θερμές και υγρές αέριες μάζες του ΑΟΣ σε ανώτερα ύψη, αποτελεί τη θρυσάλιδα για την δημιουργία δευτερογενών κυττάρων και συντηρεί τα ήδη υπάρχοντα, β) η ανάπτυξη μεγάλων ποσοτήτων πρωτογενών παγοκρυστάλλων (pristine ice) στην κορυφή των νεφικών σχηματισμών, προηγείται της παραγωγής μεγαλύτερων παγοκρυστάλλων (π.χ. χαλαζιού) στα μεσαία στρώματα του νέφους και γ) η παραγωγή μεγάλων παγοκρυστάλλων στο καταιγιδόφορο νέφος, συμπίπτει χωροχρονικά με τις περιοχές στις οποίες εμφανίζεται μέγιστα η τυρβώδης κινητική ενέργεια και εκεί όπου επικρατούν έντονες ανοδικές κινήσεις,

**Βιβλιογραφία**

Σιούτας Β. Μ., Τατιάνα Τζουμάκη, Κυριάκος Τσιτουρίδης και Δημήτρης Φόρης, 2000: Εθνικό Πρόγραμμα χαλαζικής προστασίας, Ετήσια Έκθεση 1999, Κέντρο Τροποποίησης καιρού, ΕΛΓΑ.

Φλόκα, Ε. Α. και Θ. Σ. Καρακώστας, 1988: Συμβολή στην πρόγνωση καταιγίδων στο βορειοελλαδικό χώρο. *Μετεωρολογικά*, 73, 229-238, Θεσσαλονίκη 1988.

Φλόκα, Ε. Α., 1993: Συμβολή στη μελέτη του προβλήματος της κυκλογένεσης στο Αιγαίο Πέλαγος. *Διδακτορική Διατριβή*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 200 pp.

Federer, B. and A. Waldvogel, 1975: Hail and Raindrop Size Distributions from a Swiss Multicell Storm. *J. Appl. Meteor.*, 14 (1), 91-97.

Kallos, G., and M. Segal, 1991: "On the meteorological conditions during post-precipitation periods. Implications to air pollution". *J. Appl. Meteorol.*, 30, pp. 297-311.

Kotroni, V., Lagouvardos, K., Kallos, G., and D. Ziakopoulos, 1999: Severe flooding over central and southern Greece associated with pre-cold frontal orographic lifting. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 125, 967-991

Krichak, S. O., M. Tsidulko, and P. Alpert, 2000: November 2, 1994, severe storms in the southeastern Mediterranean. *Atmos. Res.*, 53, 45-62.

Pielke, R.A, W.R. Cotton, R.L Walko, C.J. Tremback, W.A Lyons, L.D. Grasso, M.E. Nicholls, M.D. Moran, D.A. Wesley, T.J. Lee, and J.H. Copeland, 1992: A comprehensive meteorological modelling system - RAMS. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 49, 69-91.

Pruppacher, R., H and J. D. Klett, 1997: *Microphysics of clouds and precipitation* (Second revised and enlarged edition). Kluwer Academic Publishers, Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, Vol. 18, ISBN: 0-7923-4211-9

Verliden, J., P. J. Flatau and W. R. Cotton, 1990: Analytical solutions to the collection growth equation: Comparison with approximate methods and application to cloud microphysics parameterization schemes. *J. Atmos. Sci.*, 47, 2871-2880.

Yuter, S. E., and R. A. Houze Jr., 1995: Three-Dimensional Kinematic and Microphysical Evolution of Florida Cumulonimbus. Part II: Frequency Distributions of Vertical Velocity, Reflectivity, and Differential Reflectivity. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 1941-1963.