



ANNA K. ΚΑΜΠΟΥΡΗ Πτυχιούχος Φυσικός

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΕΩΝ ΜΙΚΡΟΦΥΣΙΚΗΣ ΣΕ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΚΑΙΡΟΥ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ "ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ, ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ"

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 2018





ANNA K. ΚΑΜΠΟΥΡΗ Πτυχιούχος Φυσικός

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΕΩΝ ΜΙΚΡΟΦΥΣΙΚΗΣ ΣΕ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΚΑΙΡΟΥ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών στη «Μετεωρολογία, Κλιματολογία και Ατμοσφαιρικό Περιβάλλον»

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 28/08/2018

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Καρακώστας Θεόδωρος,
 Καθηγητής, Επιβλέπων
 Πυθαρούλης Ιωάννης,
 Κατράγκου Ελένη,
 Καθηγητής, Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής
 Επίκουρη Καθηγήτρια, Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής



© Άννα Κ. Καμπούρη, Φυσικός, 2018 Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΕΩΝ ΜΙΚΡΟΦΥΣΙΚΗΣ ΣΕ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΚΑΙΡΟΥ – Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

© Anna K. Kampouri, Physicist, 2018 All rights reserved. EVALUATION OF MICROPHYSICAL PARAMETERIZATION SCHEMES WITH THE USE OF A NUMERICAL WEATHER PREDICTION MODEL – *Master Thesis*

Citation:

Καμπούρη Α. Κ., 2018. – Αξιολόγηση Παραμετροποιήσεων Μικροφυσικής σε Αριθμητικό Μοντέλο Πρόγνωσης Καιρού. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 100 σελ. Kampouri A. K., 2018. – Evaluation of Microphysical Parameterization Schemes with the use of a Numerical Weather Prediction Model. Master Thesis, Dept. of Meteorology and Climatology, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 100pp.

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

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

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία με θέμα: «Αξιολόγηση παραμετροποιήσεων μικροφυσικής σε αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού» εκπονήθηκε στο πλαίσιο των μεταπτυχιακών μου σπουδών στον Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

А.П.Ө

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Θεόδωρο Καρακώστα, Καθηγητή και επιβλέποντα της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας, για τις γνώσεις και την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και για την αμέριστη εμπιστοσύνη και συμπαράσταση που έδειξε στο πρόσωπό μου. Τον ευχαριστώ, γιατί ήταν δίπλα μου, από την πρώτη στιγμή της γνωριμίας μας και η ενθαρρυντική του στάση ήταν κινητήριος δύναμη για τη διεκπεραίωση του προγράμματος των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τα άλλα δυο μέλη της τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, τον κ. Ιωάννη Πυθαρούλη, Επίκουρο Καθηγητή και την κυρία Ελένη Κατράγκου, Επίκουρη Καθηγήτρια, αρχικά για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών, καθώς και για την ουσιαστική συμβολή τους κατά τη διάρκεια της συγγραφής της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας.

Επιπλέον, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον υποψήφιο διδάκτορα του Τομέα, κύριο Στέργιο Κάρτσιο, για την αμέριστη βοήθεια του, που δίχως δεύτερη σκέψη, μου πρόσφερε και για την άψογη συνεργασία που είχαμε όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου που με στηρίζει σε κάθε βήμα της ζωής μου. Η βοήθεια τους είναι ανεκτίμητη. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου για την ηθική υποστήριξη και την ενθάρρυνσή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Στην Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης πραγματοποιούνται παρούσα προσομοιώσεις ευαισθησίας για τη μελέτη της συμπεριφοράς του μοντέλου WRF και της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στις μικροφυσικές διεργασίες τριών διαφορετικών σχημάτων της μικροφυσικής των νεφών, κατά την προσομοίωση ενός ισχυρού επεισοδίου έντονης βροχόπτωσης που σημειώθηκε στις 21 Μαΐου 2016. Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε η Κεντρική Μακεδονία (πιο συγκεκριμένα οι νομοί Ημαθίας και Πέλλας) στη Βόρεια Ελλάδα, εξαιτίας των ιδιόμορφων φυσιογραφικών χαρακτηριστικών και του πολύπλοκου αναγλύφου της. Το αίτιο δημιουργίας του έντονου επεισοδίου της βροχόπτωσης είναι δυναμικό και οφείλεται στην παρουσία ενός κλειστού βαρομετρικού χαμηλού στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa. Πραγματοποιήθηκαν τρεις (3) προσομοιώσεις με τρία (3) διαφορετικά σχήματα μικροφυσικής των νεφών. Αρχικά με το WSM6 – WRF Single moment 6-Class microphysics scheme που θεωρείται ως προσομοίωση αναφοράς (control experiment), ενώ για τις προσομοιώσεις ευαισθησίας (sensitivity experiments) χρησιμοποιήθηκαν δυο άλλα σχήματα μικροφυσικής, το WDM6 – WRF Double moment 6-Class microphysics scheme και το Goddard Single moment 6-Class microphysics scheme. Οι παραμετροποιήσεις των φυσικών διεργασιών που διέπουν τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες στη διαμόρφωση της αριθμητικής πρόγνωσης του καιρού, επομένως η επιλογή του καταλληλότερου και πιο αντιπροσωπευτικού σχήματος είναι πολύ σημαντική. Τα αποτελέσματα των δυο προσομοιώσεων συγκρίνονται με το control πείραμα, για παραμέτρους όπως: η συνολική ημερήσια βροχόπτωση, η ανακλαστικότητα, η αναλογία μίγματος του νερού των νεφών (QCLOUD) και η συνολική ποσότητα παγοσωματιδίων τύπου graupel. Για τις αριθμητικές προσομοιώσεις του φαινομένου της παρούσης εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα σύγχρονο αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού μέσης κλίμακας το μοντέλο Weather Research and Forecasting (WRF-ARW έκδοση 3.5.1), στο οποίο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες, μέσα από ένα πλήθος παραμετροποιήσεων των φυσικών διεργασιών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα τα τρία σχήματα μικροφυσικής εμφανίζουν διαφορές, τόσο στη χωρική κατανομή της βροχόπτωσης, όσο και στην έντασή της. Όσον αφορά στην παράμετρο της ανακλαστικότητας, τα δυο σχήματα της μικροφυσικής των

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Α.Π.Θ

VIOC

νεφών WSM6 και WDM6 εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά, με κάποιες μικρές διάφορες στην έντασή της, αφού δύναται να παράγουν παρόμοιες ποσότητες graupel. Απεναντίας, το Goddard, που την προσομοιώνει με διαφορετικό τρόπο από το WSM6, οι εμφανιζόμενες διαφορές του οφείλονται στη μεγάλη αθροιστική ποσότητα σωματιδίων graupel.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τέλος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα στο WSM6 εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές αναλογίας μίγματος του νερού των νεφών (QCLOUD) συγκριτικά με τα άλλα δυο σχήματα, καθώς το κάθε σχήμα διαχειρίζεται με διαφορετικό τρόπο τις μικροφυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα στα νέφη.

А.П.Ө The aim of this study is to examine the interaction between microphysical parameterization schemes, on the representation of an extreme precipitation event over the region of Central Macedonia. The simulations have been performed with the high resolution non-hydrostatic WRF - ARW v3.5.1 numerical weather prediction model. This heavy precipitation event associated with the appearance of a closed low upper-air synoptic circulation type, occurred on 21 May 2016, affecting Central Macedonia, in northern Greece. Three microphysical schemes are utilized in the sensitivity experiments. The WSM6 - WRF Single moment 6-Class microphysics scheme considered as control experiment, whereas for sensitivity experiments were used the other two microphysical parameterization schemes, WDM6 - WRF Double moment 6-Class microphysics scheme and Goddard Single moment 6-Class microphysics scheme. Simulations with the three bulk microphysical parameterization schemes showed that differences between them were considerable and microphysics has a major impact on the organization and precipitation processes. Contemporary atmospheric numerical models contain a variety of microphysical parameterization schemes in order to represent the various atmospheric processes that take place in subgrid scales. The choice of the appropriate combination of such schemes is a challenging task not only for research, but also for operational purposes. This choice becomes an important decision in cases of high impact weather in which the forecast errors are expected to be large. The results are compared with the control experiment and the differences for total precipitation, reflectivity and profiles of hydrometeors are discussed. According to the results, the WSM6 and WDM6 schemes produced the local maximum of heavy rainfall similarly. On the other hand, the Goddard scheme simulated broader spatial rainfall distribution than WSM6.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ABSTRACI

The WDM6 scheme produced the reflectivity pattern in good agreement with WSM6 scheme. This is because both simulations produced similar amounts of accumulated total grid scale graupel. While the Goddard scheme showed a different reflectivity pattern from the WSM6 scheme due to the fact that it produced larger amounts of accumulated total grid scale graupel than WSM6.

In summary, graupel processes appear to play an important role in determining the storm structure. Finally, it is noted that the WSM6 scheme exhibit much large amounts of cloud water in comparison to profiles from the other two schemes.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ψ		
	1.1 Εισαγωγή	1
	1.2 Το αριθμητικό μοντέλο Weather Research and Forecasting (WRF)	3
	1.3 Η δομή του συστήματος WRF	4
	1.3.1 Το σύστημα προ-επεξεργασίας του WRF (WPS)	5
	1.3.2 Αρχικές - πλευρικές οριακές συνθήκες και τρισδιάστατο πλέγμα	7
	1.3.3 Σύστημα αφομοίωσης δεδομένων WRF-DA	12
	1.3.4 Το σύστημα μετ-επεξεργασίας και οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων τ	του
	WRF (Post-Processing and Visualization)	12

Κεφάλαιο 2

τ.		
	2.1 Φυσικές Διεργασίες	. 14
	2.2 Μικροφυσικές διεργασίες μέσα στα νέφη και στο WRF	. 15
	2.3 Παραμετροποιήσεις των μικροφυσικών διεργασιών	. 17
	2.4 Σχήματα Μικροφυσικής στο WRF	. 18
	2.5 Single-moment σχήματα μικροφυσικής	. 19
	2.5.1 Σχήμα Kessler	. 19
	2.5.2 Σχήμα Purdue Lin (PLin)	. 20
	2.5.3 Σχήμα WRF Single-Moment 3-class (WSM3)	. 24
	2.5.4 Σχήμα WRF Single-Moment 5-class (WSM5)	. 25
	2.5.5 Σχήμα WRF Single-Moment 6-class (WSM6)	. 26
	2.5.6 Σχήμα Eta Ferrier	. 27
	2.5.7 Σχήμα Thompson	. 29
	2.5.8 Σχήμα Goddard	. 30
	2.6 Double moment σχήματα Μικροφυσικής	. 31
	2.6.1 Σχήμα Morrison	. 31
	2.6.2 Σχήμα WRF Double-Moment WDM5-class και 6-class	. 33
	2.7 Αναλυτική περιγραφή του WRF Single-Moment 6-class (WSM6)	. 33
	2.8 Αναλυτική περιγραφή του Goddard Cumulus Ensemble (GCE)	. 36
	2.9 Αναλυτική περιγραφή του WRF Double-Moment 6-class (WDM6)	. 41
	2.10 Σύγκριση των σχημάτων μικροφυσικής WSM6, WDM6 και Goddard-Επιμέρου	ς
	συμπεράσματα.	. 45
	2.10.1 Διαφορές των WSM6-WDM6 σχημάτων ως προς τη βροχόπτωση	. 46
	2.10.2 Διαφορές των WSM6-WDM6 σχημάτων ως προς την ανακλαστικότητα.	. 47
	2.10.3 Διαφορές των WSM6-WDM6 σχημάτων ως προς την αναλογία μίγματος	ς
	υδρομετεώρων	. 48
	2.10.4 Διαφορές των WSM6-Goddard σχημάτων ως προς τη βροχόπτωση	. 49
	2.10.5 Διαφορές των WSM6-Goddard σχημάτων ως προς την ανακλαστικότητα	ι 50
	2.10.6 Διαφορές των WSM6-Goddard σχημάτων ως προς την αναλογία	
	μίγματος υδρομετεώρων	. 51
	2.10.7 Επιμέρους συμπεράσματα	. 51

Κεφάλαιο 3

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

	55
3.1 Συνοπτικές συνθηκές	
👗 🔰 3.1.1 Ανάλυση χαρτών στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa	57
3.1.2 Πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa)	58
3.1.3 Ανάλυση χαρτών στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa	60
3.1.4 Απεικόνιση του στροβιλισμού στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa	ı 61
3.1.5 Ανάλυση θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης στην επιφάνεια	62
3.1.6 Σχετική υγρασία στην ισοβαρική επιφάνεια των 700 hPa	63
3.1.7 Χάρτες διεύθυνσης και ταχύτητας του επιφανειακού ανέμου	64
3.1.8 Θερμοδυναμική Ανάλυση	65
3.2 Αρχικές Συνθήκες μοντέλου WRF-ARW	67

Κεφάλαιο 4

4.1 Εισαγωγή	
4.1.1 Σύγκριση της συνοπτικής κατάστασης στα πειράματα ευαισθ	θησίας71
4.2 Αθροιστική βροχόπτωση 24ώρου	
4.3 Μέγιστη ανακλαστικότητα	
4.4 Προφίλ των υδρομετεώρων	

Κεφάλαιο 5

5.1 Συμπεράσματα

3λιογραφία101



$1.1 \text{ EISAF} \Omega \Gamma \text{H}$

Η Αριθμητική Πρόγνωση του Καιρού (Numerical Weather Prediction) βασίζεται στη χρήση αριθμητικών μοντέλων, τα οποία χρησιμοποιούν βασικές εξισώσεις για την αναπαράσταση των θεμελιωδών διεργασιών που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα. Ο Vilhelm Bjerknes το 1904 ήταν ο πρώτος που αναγνώρισε ότι η πρόγνωση του καιρού μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μαθηματικό πρόβλημα αρχικών συνθηκών, καθώς συγκεκριμένες εξισώσεις ερμηνεύουν τη μεταβολή των μετεωρολογικών μεταβλητών με το χρόνο (Shuman, 1989). Ύστερα από μια δεκαετία περίπου, ο Lewis Fry Richardson έκανε το πρώτο πείραμα δυναμικής πρόγνωσης καιρού με αριθμητικές μεθόδους, γρησιμοποιώντας τις εξισώσεις της υδροδυναμικής (Richardson, 1922), το οποίο έθεσε τη βάση για τη δημιουργία των σύγχρονων ατμοσφαιρικών μοντέλων. Η πρώτη επιτυχημένη αριθμητική πρόγνωση έγινε σχεδόν 30 χρόνια αργότερα (1950) από μια ομάδα ερευνητών που συνέστησε ο Jon von Neumann, οι όποιοι πραγματοποίησαν την πρώτη 48-ωρη πρόγνωση καιρού χρησιμοποιώντας ένα βαροτροπικό μοντέλο στον πρώτο ηλεκτρονικό υπολογιστή (τον αποκαλούμενο ENIAC). Οι Charney et al., (1950) κατάφεραν να ολοκληρώσουν με επιτυχία την αριθμητική πρόγνωση, χρησιμοποιώντας τη βαροτροπική εξίσωση του στροβιλισμού στα 500 hPa. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, η πρακτική και ερευνητική χρησιμότητα των μετεωρολογικών μοντέλων να αρχίσει να γίνεται αποδεκτή από την επιστημονική κοινότητα.

Τα τελευταία χρόνια με τη ραγδαία αύξηση της ισχύος των ηλεκτρονικών υπολογιστών και την καλύτερη κατανόηση των φυσικών διεργασιών της ατμόσφαιρας (Pielke, 2002), αναπτύχθηκαν διάφορα επιχειρησιακά παγκόσμια μοντέλα πρόγνωσης καιρού, όπως είναι το GFS (Global Forecasting System) και το μοντέλο του ECMWF (European Center for Mesoscale Weather Forecasts).

Επιπρόσθετα, αναπτύχθηκαν και πολλά σύγχρονα περιοχικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού (regional models), όπως είναι το MM5, ETA, RAMS και το WRF, τα οποία προσομοιώνουν τις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στη μεσαία κλίμακα και χρησιμοποιούνται σε επιχειρησιακή βάση από διάφορες ερευνητικές ομάδες και από πολλές μετεωρολογικές υπηρεσίες στον κόσμο (Dudhia, 1993, Pielke et al., 1992,

Skamarock et al., 2008). Η δυνατότητά τους να παρέχουν προγνώσεις υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης, τα καθιστά ιδιαίτερα σημαντικά στην πρόγνωση έντονων καιρικών φαινομένων στη μεσαία κλίμακα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η χωρική ανάλυση του μοντέλου παίζει σπουδαίο ρόλο στην αναπαράσταση των φυσικών διεργασιών. Οι φυσικοί μηχανισμοί που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα, όπως είναι τα νέφη και ο υετός -είτε αναπαριστάνονται στα σημεία πλέγματος, είτε λαμβάνονται υπόψη μέσω παραμετροποιήσεων- εάν δεν μπορούν να αναλυθούν από το μοντέλο λόγο ανεπαρκούς χωρικής ανάλυσης. Οι παραμετροποιήσεις των φυσικών διεργασιών που διέπουν τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες στη διαμόρφωση της αριθμητικής πρόγνωσης του καιρού. Η κατανόηση της συμπεριφοράς τους, ιδιαίτερα στην προσομοίωση των έντονων καιρικών φαινομένων, μπορεί να βοηθήσει, όχι μόνο στην εύρεση των καταλληλότερων επιλογών σχημάτων, αλλά κυρίως στη βελτιστοποίηση τους.

Τα τελευταία χρόνια, εξαιτίας της αύξησης των επεισοδίων των έντονων βροχοπτώσεων στην περιοχή της Μεσογείου και ειδικότερα στον Ελλαδικό χώρο (IPCC, 2007), η προσομοίωσή τους από τα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού, απαρτίζει ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα που αντιμετωπίζει η επιστημονική κοινότητα και εξακολουθεί να αποτελεί μια εμπειρική διαδικασία, παρά τις προσπάθειες βελτίωσης των σχημάτων αυτών που έχουν πραγματοποιηθεί τις τελευταίες δεκαετίες.

Η δυσκολία παραμετροποίησης του υετού και των νεφών έγκειται κυρίως στο γεγονός ότι ο σχηματισμός τους εξαρτάται από ένα πλήθος διεργασιών που πραγματοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος χωρικών και χρονικών κλιμάκων. Ο σχηματισμός και η διαδικασία ανάπτυξης των νεφοσταγόνων μπορεί να συμβαίνει σε μερικά μικρόμετρα, ενώ τα νεφικά συστήματα να εκτείνονται έως και δεκάδες και εκατοντάδες χιλιόμετρα. Επιπρόσθετα, όσον αφορά στις χρονικές κλίμακες που σχετίζονται με τα νέφη και τη μικροφυσική αυτών, κυμαίνονται από μερικά λεπτά έως και εβδομάδες (Καρακώστας, 2005). Όλα τα παραπάνω καθιστούν την προσομοίωση των βροχοπτώσεων από τα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού πολύ δύσκολη.

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης των παραμετροποιήσεων της μικροφυσικής, όσον αφορά στην προσομοίωση ενός επεισοδίου έντονης βροχόπτωσης στην περιοχή της κεντρικής Μακεδονίας, με τη βοήθεια ενός σύγχρονου περιοχικού, μη υδροστατικού ατμοσφαιρικού μοντέλου WRF – ARW. Το επεισόδιο της βροχόπτωσης που μελετάται σημειώθηκε στις 21 Μαΐου του 2016, στην ευρύτερη περιοχή των Νομών Ημαθίας και Πέλλας, στη Βόρεια Ελλάδα. Τρία (3) σχήματα μικροφυσικής των νεφών χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα ευαισθησίας. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται μεταξύ τους για διάφορες φυσικές παραμέτρους, όπως: βροχόπτωση, ανακλαστικότητα, αναλογία μίγματος του νερού των νεφών (QCLOUD) και συνολική ποσότητα παγοσωματιδίων τύπου graupel.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

1.2 TO APIOMHTIKO MONTEAO WEATHER RESEARCH AND FORECASTING (WRF)

Το αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού Weather Research and Forecasting (WRF) είναι ένα ευέλικτο και προηγμένης τεχνολογίας μη-υδροστατικό περιοχικό μοντέλο. Αποτελείται από σύστημα διαφορικών εξισώσεων με μερικές παραγώγους μετεωρολογικών μεταβλητών ως προς το χρόνο, τα οποία προβλέπουν την κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα, στη βάση των αρχών διατήρησης της ορμής, της μάζας, της ενέργειας και της υγρασίας.

Επιπρόσθετα, παρέχει τη δυνατότητα επιλογής δύο ξεχωριστών δυναμικών πυρήνων (solvers): του Advanced Research WRF (ARW) ο οποίος αναπτύχθηκε από το Εθνικό Κέντρο Έρευνας της Ατμόσφαιρας των Η.Π.Α (National Center for Atmospheric Research - NCAR) και του πυρήνα Non-hydrostatic Mesoscale Model (NMM) που εξελίχθηκε από το Εθνικό Κέντρο Περιβαλλοντικών Προβλέψεων των Η.Π.Α (National Center for Environmental Prediction - NCEP) (Skamarock et al., 2008).

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η ανάλυση των βασικών χαρακτηριστικών του WRF-ARW, όπως περιγράφονται στους Skamarock et al., (2008) και Wang et al., (2012).

Το WRF-ARW χρησιμοποιείται, τόσο επιχειρησιακά, όσο και ερευνητικά. Συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα μέσης κλίμακας αριθμητικό σύστημα πρόγνωσης καιρού, το οποίο σύμφωνα με πολλούς ερευνητές είναι κατάλληλο για ένα εύρος εφαρμογών, όπως:

- προγνώσεις σε πραγματικό χρόνο για βελτιστοποίηση της πρόγνωσης,
- προγνώσεις σε παγκόσμια και περιοχική κλίμακα, καθώς εφαρμόζεται, τόσο σε παγκόσμιες, όσο και σε μέσης κλίμακας, ή περιοχικές προγνώσεις,

έρευνα παραμετροποιήσεων των φυσικών διαδικασιών, όπως η τυρβώδης ροή, η ηλιακή ακτινοβολία, κ.α.,

- εφαρμογές συζευγμένων μοντέλων, όπως ο συνδυασμός WRF και COBEL για την πρόγνωση ομίχλης (Stolaki et al., 2012) και η σύζευξη WRF και SFIRE για τη μελέτη δασικών πυρκαγιών (Mandel et al., 2011, Kartsios et al., 2014),
- έρευνα αφομοίωσης δεδομένων για τη μελέτη των δεδομένων που εισάγονται στο μοντέλο,
- ιδεατές προσομοιώσεις φαινομένων και διεργασιών που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα (ανωμεταφορά, βαροκλινικά κύματα, LES).

Όσον αφορά στην ανάπτυξη του WRF, προήρθε μέσω προσπάθειας και συνεργασίας πολλών οργανισμών και ερευνητικών κέντρων, κάποια εκ των οποίων είναι τα εξής: το Εθνικό Κέντρο Έρευνας της Ατμόσφαιρας των Η.Π.Α (National Center for Atmospheric Research - NCAR), η Εθνική Διοίκηση Ωκεανών και Ατμόσφαιρας των Η.Π.Α (National Oceanic and Atmospheric Administration -NOAA), η Μετεωρολογική Υπηρεσία της Πολεμικής Αεροπορίας των Η.Π.Α (Naval AFWA) και το Εργαστήριο Έρευνας του Πολεμικού Ναυτικού των Η.Π.Α (Naval Research Laboratory - NRL).

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός, ότι τα σύγχρονα (state of the art) και νέας γενιάς αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού έχουν γίνει αποδεκτά από την επιστημονική κοινότητα, επιδεικνύοντας με αυτόν τον τρόπο, την ερευνητική, αλλά και την πρακτική χρησιμότητά τους, στα χέρια των μετεωρολόγων.

Το WRF-ARW είναι διαθέσιμο στο ευρύ κοινό, καθώς πρόκειται για ελεύθερο λογισμικό, ανοιχτού κώδικα (open source) που λειτουργεί επιχειρησιακά σε καθημερινή βάση στον Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (http://meteo.geo.auth.gr).

1.3 H $\triangle OMH$ TOY $\Sigma Y \Sigma THMATO \Sigma$ WRF

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η δομή του συστήματος WRF-ARW (έκδοση 3.5.1) όπως αυτή παρουσιάζεται από τους Wang et al., (2012) απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1. Αποτελείται, από το σύστημα προ-επεξεργασίας των δεδομένων (WPS), αφομοίωσης των δεδομένων (WRF-DA), το δυναμικό πυρήνα ARW (solver) και το σύστημα μετ-επεξεργασίας και οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων του μοντέλου.



Σχήμα 1.1. Δομή του συστήματος WRF (από Wang et al., 2012).

1.3.1. Το σύστημα προ-επεξεργασίας του WRF (WPS)

Το WPS αποτελεί ένα ανεξάρτητο του πυρήνα ARW σύστημα και περιέχει ένα σύνολο προγραμμάτων (geogrid, ungrib, metgrid), στα οποία εισάγονται τα στατικά δεδομένα (τοπογραφία, χρήσεις γης, κτλ.) και τα μετεωρολογικά δεδομένα (συνήθως σε Grib μορφή). Έπειτα, οι αρχικές και οριακές συνθήκες «μετατρέπονται» κατάλληλα, ώστε να είναι έτοιμες για επεξεργασία από τον πυρήνα ARW (Skamarock et al., 2008). Στο διάγραμμα του Σχήματος 1.2 παρουσιάζεται η δομή του συστήματος προ-επεξεργασίας WPS.

Τα γεωγραφικά δεδομένα (στατικά δεδομένα), είναι δισδιάστατα δεδομένα που αναφέρονται στην τοπογραφία της περιοχής, όπου πρόκειται να πραγματοποιηθεί μια προσομοίωση. Τέτοιου είδους δεδομένα είναι, η ορογραφία, το υψόμετρο, το γεωγραφικό μήκος και πλάτος, η λευκαύγεια (albedo), η φυτοκάλυψη (vegetation), η υφή του εδάφους (soil texture) και η μάσκα ξηράς/θάλασσας (land/sea mask). Παρέχονται από βάσεις παγκόσμιων δεδομένων, τα οποία ανάλογα με τις ανάγκες του εκάστου προβλήματος διατίθενται σε διαφορετικές αναλύσεις.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Επίσης, απαραίτητη κρίνεται η χρήση όλων των διαθέσιμων πληροφοριών, για τις θερμοκρασίες στην επιφάνεια των υδάτινων μαζών - SSTs (Sea Surface Temperature) στην περιοχή ολοκλήρωσης του μοντέλου.

Στα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης μικρής διάρκειας (nowcasting) ή μεσοπρόθεσμων προγνώσεων, δηλαδή σε αυτά που παρέχουν προγνώσεις μόνο για τις επόμενες λίγες ώρες (συνήθως έως 6 ώρες), οι παραπάνω πληροφορίες συνήθως διατηρούνται αμετάβλητες κατά τη διάρκεια της πρόγνωσης, ή της προσομοίωσης.



Σχήμα 1.2. Διάγραμμα ροής της διαδικασίας εισαγωγής και εξαγωγής δεδομένων από το σύστημα προ-επεξεργασίας του μοντέλου (από Skamarock et al., 2008).

Το πρώτο τμήμα του συστήματος προ-επεξεργασίας WPS είναι το geogrid.exe. Χρησιμοποιεί γεωγραφικά δεδομένα (στατικά δεδομένα) και είναι το τμήμα στο όποιο καθορίζονται: η περιοχή ολοκλήρωσης (domain), δηλαδή η περιοχή της γης που καλύπτει το μοντέλο και εκεί όπου θα πραγματοποιηθούν οι αριθμητικές προσομοιώσεις, ο αριθμός των σημείων πλέγματος (number of grid points), η θέση και ο αριθμός των εμφωλευμένων περιοχών (nest locations), καθώς επίσης και η χωρική διακριτοποίηση (grid distances) των σημείων πλέγματος, δηλαδή η μέση απόσταση ανάμεσα στα γειτονικά σημεία πλέγματος της ίδιας μεταβλητής. Στη φάση προετοιμασίας των δεδομένων τα παραπάνω δεδομένα παρεμβάλλονται στα σημεία πλέγματος του μοντέλου, στην προκαθορισμένη περιοχή ολοκλήρωσης και στην επιθυμητή ανάλυση. Με το τμήμα ungrib.exe, γίνεται η εισαγωγή, η επεξεργασία και η αποκωδικοποίηση των μετεωρολογικών δεδομένων ως δεδομένα αναλύσεων ή/και προγνώσεων από παγκόσμια αριθμητικά μοντέλα (GFS, ECMWF κτλ.), ώστε να οριστούν οι παράμετροι που απαιτούνται για την ολοκλήρωση του μοντέλου.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τα μετεωρολογικά δεδομένα είναι διαθέσιμα σε Grib μορφή, τα οποία προέρχονται από αναλύσεις ή προγνώσεις ενός άλλου περιοχικού ή παγκόσμιου αριθμητικού μοντέλου, όπως το North American Mesoscale (NAM) ή το Global Forecast System (GFS), για ποικίλα χρονικά διαστήματα και τα οποία είναι απαραίτητα για την αρχικοποίηση του μοντέλου. Τα μετεωρολογικά δεδομένα εξαρτώνται από το χρόνο και όπως αναφέρουν οι Skamarock et al., (2008) είναι τα εξής: η επιφανειακή πίεση και η πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας (Pa), η θερμοκρασία (K) και η υγρασία (kg/kg) στην επιφάνεια του εδάφους και σε διάφορα βάθη, το ύψος χιονιού (m), η επιφανειακή θερμοκρασία (K), η θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας (K) και ένας δείκτης (flag), που δηλώνει την ύπαρξη θαλάσσιου πάγου. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά μετατρέπονται σε μια ενδιάμεση δυαδική μορφή δεδομένων.

Το επόμενο τμήμα του συστήματος προ-επεξεργασίας, είναι το metgrid.exe, στο οποίο γίνεται η οριζόντια παρεμβολή της ενδιάμεσης μορφής των μετεωρολογικών δεδομένων, που εξάγονται από το ungrib.exe στο πλέγμα των περιοχών ολοκλήρωσης του μοντέλου που ορίσθηκαν από το geogrid.exe.

1.3.2. Αρχικές - πλευρικές οριακές συνθήκες και τρισδιάστατο πλέγμα

Το τελικό αποτέλεσμα πριν από την έναρξη της εκάστοτε προσομοίωσης είναι η εκτέλεση του προγράμματος real.exe, το όποιο σύμφωνα με τους Wang et al., (2012):

- Διαβάζει τα δεδομένα (γεωγραφικά και μετεωρολογικά) μέσου του αρχείου namelist.input που εισάγονται από το WPS.
- Προετοιμάζει τα πεδία που αφορούν στην τοπογραφία, για να χρησιμοποιηθούν από το μοντέλο.
- Υποβάλλει τις πολλαπλές χρονικές περιόδους εισαγωγής δεδομένων, σε επεξεργασία, για να παράγει τις πλευρικές οριακές συνθήκες, που απαιτούνται για τις περιοχικές και μέσης κλίμακας προγνώσεις.
- Συνδέει τα τρισδιάστατα οριακά δεδομένα (τις οριζόντιες συνιστώσες της ταχύτητας, τη δυνητική θερμοκρασία, την αναλογία της αναμεμιγμένης

υγρασίας και το γεωδυναμικό ύψος) με τη συνολική στήλη ατμοσφαιρικής

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

πίεσης.

Στην ουσία, με αυτή τη διαδικασία παράγονται δεδομένα, τα οποία είναι έτοιμα για να χρησιμοποιηθούν από τον πυρήνα ARW για περαιτέρω ανάλυση. Τα δεδομένα του προγράμματος real.exe, αποτελούν μια ολοκληρωμένη κατάσταση της ατμόσφαιρας, στην τρισδιάστατη μορφής της, στο επιλεγμένο οριζόντιο εναλλασσόμενο πλέγμα του μοντέλου και σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Σύμφωνα με τους Skamarock et al., (2008), τα δεδομένα εισόδου του ARW είναι τρισδιάστατα πεδία της θερμοκρασίας (και της επιφάνειας) σε ^οK, της σχετικής υγρασίας και των οριζόντιων συνιστωσών της ροής της σε ms⁻¹, (ύστερα από περιστροφή τους στο προβολικό σύστημα που έχει επιλεχθεί).

Μέσω του προγράμματος real.exe πραγματοποιείται η κατακόρυφη παρεμβολή των μετεωρολογικών δεδομένων πάνω στα κατακόρυφα επίπεδα του μοντέλου. Το τρισδιάστατο πλέγμα που χρησιμοποιείται είναι το Arakawa τύπου C, ενώ κατά την οριζόντια διεύθυνση, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης επάλληλων-εμφωλευμένων πλεγμάτων (nested grids). Με τη χρήση του πλέγματος Arakawa τύπου C, το WRF-ARW τοποθετεί τις μεταβλητές στο χώρο (Σχήμα 1.3).

Στο κέντρο του κάθε κελιού υπολογίζονται η δυνητική θερμοκρασία, η πίεση και οι αναλογίες μίγματος των υδρατμών και των υδρομετεώρων (θ, p, q). Οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου (u, υ, w) τοποθετούνται στις πλευρές των κελιών και αναπαριστάνουν τη μέση τιμή των αντίστοιχων συνιστωσών ανάμεσα στο κέντρο αυτού του κελιού και του επόμενου. Κατά τον οριζόντιο άξονα το μήκος (Δx) και το πλάτος (Δy) των κελιών είναι σταθερό, ενώ στον κατακόρυφο άξονα (Δz) μπορεί να διαφέρει. (Skamarock et al., 2008, Πυθαρούλης, 2014).



Σχήμα 1.3. Δομή του εναλλασσόμενου πλέγματος Arakawa τύπου C, κατά τον οριζόντιο (αριστερά) και τον κατακόρυφο άξονα (δεξιά), (από Skamarock et al., 2008).

Στην κατακόρυφη διεύθυνση οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στα ατμοσφαιρικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού, ακολουθούν την επιφάνεια του εδάφους και γράφονται σε συντεταγμένες πίεσης (Laprise, 1992). Το WRF-ARW χρησιμοποιεί συγκεκριμένα την Eta-η συντεταγμένη, που προσδιορίζει τα κατακόρυφα επίπεδα του μοντέλου (Skamarock et al., 2008) και δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$n = (p_{h} - p_{ht}) / \mu$$
 (1.1)

όπου: p_h η υδροστατική πίεση στο επίπεδο Eta-n, p_{ht} η πίεση στην κορυφή του πλέγματος του μοντέλου, p_{hs} η πίεση στην επιφάνεια και μ = p_{hs} - p_{ht} .

Το Eta σύστημα συντεταγμένων, όπως αναφέρει ο Πυθαρούλης (2014), προτείνεται ως απάντηση στο πρόβλημα που παρουσιάζουν οι σ-συντεταγμένες (οι σσυντεταγμένες ακολουθούν την τοπογραφία), όταν αυτές εφαρμόζονται σε περιοχές με απότομο ανάγλυφο και κυρίως σε υψηλής ανάλυσης αριθμητικές προσομοιώσεις.

Στην πραγματικότητα, η συντεταγμένη Eta είναι μία άλλη μορφή της σίγμα συντεταγμένης, στην οποία για πίεση αναφοράς στο κατώτερο όριο του μοντέλου χρησιμοποιείται η πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας, αντί της επιφανειακής πίεσης.

Πιο αναλυτικά οι τιμές της Eta-n συντεταγμένης μεταβάλλονται σύμφωνα με την τοπογραφία. Παίρνει την τιμή 1 στην επιφάνεια και την τιμή 0 στο άνω όριο του



Σχήμα 1.4. Η Ετα συνταγμένη όπως χρησιμοποιείται στο WRF-ARW (από Skamarock et al., 2008).

1.0

Η συμπεριφορά της ατμόσφαιρας καθορίζεται από ένα σύνολο φυσικών νόμων που μπορούν να εκφραστούν από μαθηματικές εξισώσεις. Συγκεκριμένα, το μοντέλο WRF-ARW χρησιμοποιεί ένα σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων, μη υδροστατικών (του Euler), στην οποία οι τιμές των μεταβλητών και οι παράγωγοί τους (μεταβολές των μεταβλητών στο χώρο ή στο χρόνο) υπολογίζονται σε συγκεκριμένα σταθερά σημεία στη γη. Οι βασικές σχέσεις της ατμόσφαιρας, αναπαρίστανται με τη μορφή εξισώσεων ροής (flux form equations) και είναι της μορφής:

$$\Phi_t = \mathbf{R}(\Phi), \tag{1.2}$$

Όπου R είναι οι όροι μεταφοράς, ενώ με τον όρο Φ αναπαριστούμε μια από τις μεταβλητές U, V, W, Θ, φ, μ, Q_m. Οι θεμελιώδεις αυτές μεταβλητές είναι:

 Η επιφανειακή πίεση του ξηρού αέρα: μ = μ (x, y), (δηλαδή η διαφορά πίεσης του ξηρού αέρα ανάμεσα στην κορυφή του μοντέλου και την επιφάνεια). Η ταχύτητα του ανέμου u = u (x, y, η) και v = (x, y, η), σε καρτεσιανές συντεταγμένες (στον άξονα χ και y αντίστοιχα): $U = \mu u$ και $V = \mu v$. Αντίστοιχα το ίδιο ισχύει και για την κατακόρυφη ταχύτητα του ανέμου w.

- 3. Η διαταραχή της δυνητικής θερμοκρασίας: $\Theta = \mu \theta$, όπου $\theta = \theta$ (x, y, η).
- 4. Το γεωδυναμικό ύψος: φ = φ (x, y, η).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

> Η περιεχόμενη υγρασία του αέρα: Q_m = μq_m, όπου q_m η αναλογία μίγματος των υδρατμών, της βροχής, του πάγου κ.τ.λ.

Όλες οι παραπάνω μεταβλητές που υπολογίζονται από τις εξισώσεις (1.2), είναι προγνωστικές (prognostic), καθώς περιλαμβάνουν μερικές παραγωγούς ως προς το χρόνο. Με τις προγνωστικές εξισώσεις, δεδομένης της κατάστασης του συστήματος σε μία χρονική στιγμή, είναι δυνατή η πρόγνωση της κατάστασης σε μία μελλοντική στιγμή.

Ενώ, οι μεταβλητές που δεν περιλαμβάνουν μερικές παραγώγους ως προς το χρόνο, όπως η υδροστατική πίεση p, η δυναμική θερμοκρασία T και το ύψος z δυο ισοβαρικών επιφανειών, αναφέρονται ως διαγνωστικές μεταβλητές (diagnostic). Στις διαγνωστικές εξισώσεις η τιμή μιας μεταβλητής σε μια χρονική στιγμή καθορίζεται από άλλες μεταβλητές (τις θεμελιώδεις) την ίδια χρονική στιγμή. Επιπροσθέτως, συζευγμένες (coupled) καλούνται οι μεταβλητές οι οποίες περιέχουν τον όρο μ.

Σύμφωνα με τους Wicker και Skamarock (2002), για τη χρονική διακριτοποίηση των εξισώσεων, με άμεσο τρόπο (explicit), χρησιμοποιείται η μέθοδος Runge-Kutta 3ης τάξης (RK3). Η RK3 μέθοδος για να ολοκληρώσει ως προς το χρόνο τις μεταβλητές (1.2), ακολουθεί τρία βασικά βήματα. Ολοκληρώνοντας από Φ(t) σε Φ(t+Δt) έχουμε :

$$\Phi^* = \Phi^t + \frac{\Delta t}{3} R(\Phi^t)$$

$$\Phi^{**} = \Phi^t + \frac{\Delta t}{2} R(\Phi^*)$$

$$\Phi^{t+\Delta t} = \Phi^t + \Delta t R(\Phi^{**}), \qquad (1.3)$$

όπου, Δt είναι το χρονικό βήμα του μοντέλου. Αξίζει να αναφερθεί, ότι η μέθοδος Runge-Kutta είναι 3ης τάξης για τις γραμμικές εξισώσεις και 2ης τάξης για τις μη γραμμικές.

Όσον αφορά τη χωρική διακριτοποίηση της εξίσωσης μεταφοράς το WRF παρέχει τη δυνατότητα επιλογής ενός σχήματος 2^{ης} ή 6^{ης} τάξης (κάθετα και οριζόντια). Όπως αναφέρουν οι Haltiner and Williams (1980), το WRF-ARW υποστηρίζει τέσσερα προβολικά συστήματα:

- Lambert conformal,
- Mercator,

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Πολικό στερεογραφικό (polar stereographic) και
- Γεωγραφικό μήκος και πλάτος (latitude-longitude).

Επιπρόσθετα, για την περιστροφή της γης, εξετάζονται τα πεδία της Coriolis επίδρασης. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα να πραγματοποιηθούν οι προσομοιώσεις, είτε σε μια περιοχή ολοκλήρωσης (domain), είτε σε εμφωλευμένες περιοχές, με απλά ένθετα πλέγματα, ή με πλέγματα αμφίδρομης ροής της πληροφορίας (one-way or two-way, interaction).

1.3.3. Σύστημα αφομοίωσης δεδομένων WRF-DA

Η αφομοίωση των δεδομένων αποτελεί μια τεχνική στην οποία οι παρατηρήσεις συνδυάζονται με ένα προϊόν αριθμητικής πρόγνωσης, καθώς επίσης και με τις αντίστοιχες στατιστικές λάθους. Ο σκοπός του WRF-DA είναι η καλύτερη εκτίμηση της κατάστασης της ατμόσφαιρας. Οι διαφορές ανάμεσα στην ανάλυση και στην αριθμητική πρόγνωση, οφείλονται στο παρατηρούμενο λάθος τους.

1.3.4. Το σύστημα μετ-επεξεργασίας και οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων του WRF (Post-Processing and Visualization)

Σύμφωνα με τους Wang et al., (2012), για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου, υπάρχουν διαθέσιμα πολλά εργαλεία απεικόνισης. Μέχρι σήμερα υποστηρίζονται τα ακόλουθα: NCL, RIP4, ARWpost (μετατροπέας σε GrADS και Vis5D), WPP και VAPOR. Τα δεδομένα του WRF-ARW που είναι σε μορφή netCDF (Network Common Data Form), απεικονίζονται χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε εργαλείο απεικόνισης. Επίσης, τα NCL, RIP4 μπορούν να διαβάσουν δεδομένα σε μορφή netCDF και grib αρχεία, τα VAPOR μπορούν να διαβάσουν δεδομένα μόνο σε μορφή netCDF, το ARWpost σε μορφή netCDF και GRIB1, ενώ το WPP μπορεί να διαβάσει δεδομένα σε netCDF και σε δυαδική μορφή. Στην παρούσα εργασία για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού NCL (NCAR Command Language).

Η NCL (NCAR Command Language) αποτελεί μια γλώσσα προγραμματισμού που είναι ειδικά σχεδιασμένη για την επιστημονική ανάλυση δεδομένων και για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων με τη δημιουργία υψηλής ποιότητας δισδιάστατων, αλλά και τρισδιάστατων γραφικών (http://www.ncl.ucar.edu/). Τα πλεονεκτήματά της είναι τα εξής:

- Αποτελεί ελεύθερο λογισμικό ανοιχτού κώδικα (open source).
- Είναι εύκολη στη χρήση της.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Μπορεί να επεξεργαστεί και να συνδυάσει δεδομένα των σύγχρονων γλωσσών προγραμματισμού.
- Τα γραφήματα που εξάγει είναι υψηλής ανάλυσης.



2.1 ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

Μελέτες πολλών ερευνητών (Colle et al., 2000, Deb et al., 2008, Rao et al., 2007) έδειξαν την αδυναμία των μοντέλων να προβλέψουν ικανοποιητικά τη χωρική κατανομή και την ποσότητα της βροχής. Ακόμα και με τη χρήση υψηλότερης χωρικής διακριτοποίησης ενός αριθμητικού μοντέλου, ένας μεγάλος αριθμός φυσικών μηχανισμών δεν μπορεί να αναλυθεί από το πλέγμα του μοντέλου, αποδεικνύοντας ότι το πρόβλημα βρίσκεται στις παραμετροποιήσεις των φυσικών διεργασιών.

Σύμφωνα με το Glossary της American Meteorological Society (Huschke, 1959), ως παραμετροποίηση νοείται "η αναπαράσταση των επιδράσεων των φυσικών μηχανισμών σε ένα μοντέλο, με τη χρήση απλουστευμένων σχημάτων συναρτήσει βασικών παραμέτρων, χωρίς την προϋπόθεση οι επιδράσεις αυτές να είναι συνέπεια της δυναμικής του συστήματος".

Στο αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού, WRF-ARW, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής και χρήσης ενός μεγάλου εύρους παραμετροποιήσεων των φυσικών διεργασιών, οι οποίες μπορούν να ενσωματωθούν στον αλγόριθμο του μοντέλου ανάλογα με τις ανάγκες του προβλήματος.

Οι διάφοροι φυσικοί μηχανισμοί που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα, είτε αναπαριστάνονται στα σημεία πλέγματος (grid points), είτε εάν δεν μπορούν να αναλυθούν από το μοντέλο, λόγω ανεπαρκούς χωρικής ανάλυσης, λαμβάνονται υπόψη μέσω παραμετροποιήσεων (Πυθαρούλης, 2014). Κάποιες από τις φυσικές παραμετροποιήσεις που είναι διαθέσιμες στο WRF-ARW είναι: τα σχήματα μικροφυσικής των νεφών, οι παραμετροποιήσεις του ισοζυγίου της μικρού και μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας, των τυρβωδών κινήσεων στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, του επιφανειακού στρώματος και της κατακόρυφης αστάθειας.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το WRF-ARW προορίζεται, τόσο για ερευνητικό, όσο και για επιχειρησιακό σκοπό. Γι' αυτό, και το μοντέλο προσφέρει μια ποικιλία επιλογών των φυσικών παραμετροποιήσεων (από απλουστευμένα μέχρι και πολύπλοκα σχήματα μικροφυσικής), οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να συνδυαστούν με πολλούς τρόπους.

2.2 ΜΙΚΡΟΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΣΑ ΣΤΑ ΝΕΦΗ ΚΑΙ ΣΤΟ WRF

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το WRF-ARW περιλαμβάνει μια πληθώρα προσεγγιστικών παραμετροποιήσεων των μικροφυσικών διεργασιών. Κατηγοριοποιούνται ως προς τον αριθμό των υδρομετεώρων που αναπαριστούν, καθώς επίσης και από το εάν λαμβάνουν υπόψη διεργασίες μικτής φάσης (mixed-phase). Οι διεργασίες μικτής φάσης (mixed-phase), συμβαίνουν σε νέφη, όταν σε αυτά μπορούν να συνυπάρχουν υδρομετέωρα σε υγρή και σε στερεά φάση.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο υετός που φτάνει στο έδαφος είναι με τη μορφή βροχής. Οι φυσικοί μηχανισμοί που συμβαίνουν σε νέφη των οποίων οι κορυφές δεν επεκτείνονται σε περιοχές ψυχρότερες των 0°C (θερμά νέφη) δεν αναπαριστούν τον πάγο. Ο κυριότερος μηχανισμός που ευθύνεται για τη δημιουργία υετού στα «θερμά» νέφη είναι η σύγκρουση και συνένωση (coalescence process) μεταξύ σταγόνων βροχής (Καρακώστας, 2005).

Στην αντίπερα όχθη, στα νέφη που οι κορυφές τους εκτείνονται πάνω από την ισόθερμη των 0° C (ψυχρά νέφη), η ανάπτυξη των παγοκρυστάλλων παίζει κυρίαρχο ρόλο. Υπάρχουν δύο τρόποι μετατροπής του νερού σε πάγο, γνωστοί ως διαδικασίες Bergeron - Findeisen:

- η πήξη (freezing), δηλαδή το πάγωμα μιας σταγόνας και
- η εξάχνωση (sublimation), δηλαδή η απευθείας εναπόθεση (deposition) του ατμού σε στερεά φάση.

Ένα νέφος που περιέχει υδροσταγονίδια αποτελεί ευνοϊκό περιβάλλον σχηματισμού και ανάπτυξης (μέσω διάχυσης) παγοκρυστάλλων. Στο νέφος αυτό ο ατμός είναι κορεσμένος σε σχέση με το νερό και ως εκ τούτου υπερκορεσμένος σε σχέση με τον πάγο. Ως αποτέλεσμα, ο παγοκρύσταλλος αυξάνεται σε μέγεθος, αποκτά ταχύτητα και μπορεί να φτάσει στο έδαφος ως μεμονωμένος κρύσταλλος, ως κρύσταλλος rime, ή ως συσσωμάτωμα (Καρακώστας, 2005).

Πιο αναλυτικά, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1, τα νέφη θεωρείται ότι περιέχουν νερό σε υγρή φάση κάτω από το επίπεδο ψύξης (σε θερμοκρασίες > 0 °C) και νερό σε στερεά φάση πάνω από το ύψος της ισόθερμης των -15 °C. Σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες, τα νέφη μπορεί να περιέχουν υδροσταγόνες ή παγοκρυστάλλους, ανάλογα με το ύψος της κορυφής του νέφους. Συγκεκριμένα, εάν η κορυφή του νέφους εντοπίζεται υψηλότερα από το επίπεδο των -15°C, τότε το στρώμα ανάμεσα στους 0°C και -15°C θεωρείται ότι αποτελείται από παγοκρυστάλλους, λόγω της

πτώσης τους από τα υψηλότερα στρώματα του νέφους. Στην αντίθετη περίπτωση, το σύνολο των νεφών που βρίσκονται στο στρώμα ανάμεσα στους 0°C και -15°C, θεωρείται ότι περιέχουν νερό σε κατάσταση υπέρψυξης. Τα σχήματα μικτής φάσης περιέχουν αλληλεπιδράσεις σωματιδίων πάγου και νερού όπως τη διαδικασία στεφανώματος (riming) που παράγει χαλαζόκοκκους ή graupel.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στον Πίνακα 1, όπως παρουσιάζεται από τους Wang et al., (2012), απεικονίζονται μερικές από τις επιλογές των σχημάτων μικροφυσικής που είναι διαθέσιμα στο WRF-ARW.



Σχήμα 2.1. Κατανομή υδροσταγόνων ή/ και παγοκρυστάλλων σε ένα νέφος. (https://www.meted.ucar.edu/).

Κάποια από τα σχήματα μικροφυσικής, μπορούν να προγνώσουν μόνο την αναλογία μίγματος των υδρομετεώρων (single-moment), ενώ τα double-moment περιέχουν προγνωστικές εξισώσεις που λαμβάνουν υπόψη και την αριθμητική συγκέντρωση των υδρομετεώρων. Επομένως, η διαφορά τους έγκειται κυρίως στον αριθμό των προγνωστικών εξισώσεων που περιέχουν.

AILO				
mp_physics	Scheme	Cores	Mass Variables	Number Variables
1	Kessler	ARW	Qc Qr	
2	Lin (Purdue)	ARW (Chem)	Qc Qr Qi Qs Qg	
3	WSM3	ARW	Qc Qr	
4	WSM5	ARW NMM	Qc Qr Qi Qs	
5	Eta (Ferrier)	ARW NMM	Qc Qr Qs (Qt*)	
6	WSM6	ARW NMM	Qc Qr Qi Qs Qg	
7	Goddard	ARW	Qc Qr Qi Qs Qg	
8	Thompson	ARW NMM	Qc Qr Qi Qs Qg	Ni Nr
9	Milbrandt 2-mom	ARW	Qc Qr Qi Qs Qg Qh	Nc Nr Ni Ns Ng Nh
10	Morrison 2-mom	ARW (Chem)	Qc Qr Qi Qs Qg	Nr Ni Ns Ng
11	CESM 1.0	ARW (Chem)	Qc Qr Qi Qs	Nc Nr Ni Ns
13	SBU-YLin	ARW	Qc Qr Qi Qs	
14	WDM5	ARW	Qc Qr Qi Qs	Nn Nc Nr
16	WDM6	ARW	Qc Qr Qi Qs Qg	Nn Nc Nr

Πίνακας 1. Επιλογές παραμετροποιήσεων μικροφυσικής έκδοση 3.3 (από Wang et al., 2012)

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

*Advects only total condensates, ** Nn = CCN number, *** Vg: graupel volume

2.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΦΥΣΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

Για την παραμετροποίηση της μικροφυσικής των νεφών υπάρχουν δύο μέθοδοι, η φασματική (Bin/Spectral Microphysics) και η προσεγγιστική (Bulk Microphysics). Συγκεκριμένα, οι φασματικές παραμετροποιήσεις (Bin/Spectral Microphysics) παρέχουν τη δυνατότητα ανάλυσης όλου του φάσματος του μεγέθους των υδρομετεώρων (βροχοσταγόνες και παγοκρυστάλλοι), ενώ στις προσεγγιστικές παραμετροποιήσεις (Bulk Microphysics), η κατανομή των υδρομετεώρων εκφράζεται από μία συνάρτηση κατανομής, η οποία υπολογίζεται ανάλογα με το βαθμό προσέγγισης (single ή double-moment) της κάθε παραμετροποίησης.

Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος παραμετροποίησης είναι η προσεγγιστική, καθώς χρησιμοποιείται από τα περισσότερα μετεωρολογικά περιοχικά μοντέλα. Οι φασματικές παραμετροποιήσεις έχουν χαρακτηριστεί ως δύσχρηστες, εξαιτίας της πολυπλοκότητάς τους και της μεγάλης απαίτησής τους σε υπολογιστική ισχύ.

Οι προσεγγιστικές παραμετροποιήσεις (Bulk Microphysics), σύμφωνα με μελέτες πολλών ερευνητών, (Kessler, 1969, Lin et al., 1983, Rutledge and Hobbs, 1984),

διακρίνονται σε προσεγγίσεις single-moment ή multiple-moment. Η ανάλυση αυτών των δύο προσεγγίσεων γίνεται στην επομένη παράγραφο.

2.4 ΣΧΗΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟΦΥΣΙΚΗΣ ΣΤΟ WRF

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τα σχήματα μικροφυσικής που χρησιμοποιούνται στο WRF-ARW διακρίνονται σε δυο κατηγορίες, τα single-moment και τα double-moment. Συγκεκριμένα, υπάρχουν σχήματα διαφορετικού βαθμού ακρίβειας που μπορούν να προγνώσουν την αναλογία μίγματος (single-moment), ή/και την αριθμητική συγκέντρωση (double-moment) των υδρομετεώρων.

Στην πρώτη περίπτωση (single-moment) χρησιμοποιούνται προγνωστικές εξισώσεις διατήρησης της μάζας για κάθε κλάση (υδρατμοί, νεφοσταγόνες, κτλ.), ενώ οι κατανομές του μεγέθους των υδρομετεώρων (1.4) είναι διαγνωστικές συναρτήσεις.

$$dN_{DR} = N_{0R} exp (-\lambda_R D_R) dD_R$$
(1.4)

Τα multiple-moment σχήματα αποτελούνται από προγνωστικές εξισώσεις, τόσο για την αναλογία μίγματος των υδρομετεώρων, όσο και για την αριθμητική συγκέντρωση (number concentration) της κάθε κλάσης, (1.5). (Morrison et al., 2005, Thompson et al., 2008).

$$dN_{DR} = N_R \lambda_R^2 (N_R) D_R \exp(-\lambda_R D_R) dD_R$$
(1.5)

Μελέτες πολλών ερευνητών (Lin et al., 1983, Rutledge and Hobbs, 1984) αποδεικνύουν την υπεροχή των προσεγγίσεων, των double-moment σχημάτων, όσον αφορά την προσομοίωση των βροχοπτώσεων από νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης (convective clouds). Παρά το γεγονός ότι τα single moment σχήματα μπορεί να είναι απλούστερα και πιο εύχρηστα σε σχέση με τα double moment, τα double moment σχήματα προσομοιώνουν καλύτερα τη βροχόπτωση στα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης, αφού περιέχουν προγνωστικές εξισώσεις και για την αναλογία μίγματος των υδρομετεώρων και για την αριθμητική τους συγκέντρωση.

2.5 SINGLE-MOMENT ΣΧΗΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟΦΥΣΙΚΗΣ

2.5.1. Σχήμα Kessler

μήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το σχήμα του Kessler αποτελεί την πρώτη παραμετροποίηση των μηχανισμών ανάπτυξης της βροχόπτωσης (Kessler, 1969; 1974). Πρόκειται για ένα απλό σχήμα μικροφυσικής, το οποίο διαχειρίζεται μόνο μηχανισμούς ανάπτυξης θερμών νεφών, όπου η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη των 0 °C και δεν αναπαριστάνει τον πάγο. Χρησιμοποιείται κυρίως για ιδεατές αριθμητικές προσομοιώσεις. Επιπρόσθετα χρησιμοποιεί τρεις μεταβλητές για την αναπαράσταση της υγρασίας:

- q_v για τους υδρατμούς
- q_c για το περιέχων ύδωρ στο νέφος το οποίο αναπαριστάνει τις μικρές
 σταγόνες με διάμετρο μικρότερη από 200 μm
- q_r για τη βροχή το οποίο αναπαριστάνει τις μεγάλες σταγόνες με διάμετρο μεγαλύτερη από 200 μm



Σχήμα 2.2. Διάγραμμα ροής του σχήματος μικροφυσικής Kessler. Όπου: C είναι η συμπύκνωση (condensation), E είναι η εξάτμιση των νεφών (evaporation of cloud), A_r είναι η αυτόματη μετατροπή (autoconversion), C_r είναι η σύγκρουση και συνένωση (coalescence) των σταγόνων της βροχής με τις νεφοσταγόνες που παρασύρουν κατά την πτώση τους (accretion) και E_r είναι η εξάτμιση της βροχής (evaporation of rain), (από Dudhia J., 2010).

Οι σταγόνες με μικρή μάζα και μηδενικές ταχύτητες πτώσης, κινούνται μαζί με την αέρια μάζα και χαρακτηρίζονται ως νεφοσταγόνες (cloud drops). Ενώ, οι βροχοσταγόνες (rain drops) είναι μεγαλύτερες σε μέγεθος και οι τελικές ταχύτητές τους δίνονται από τη σχέση (1.6).

$$V(D) \cong k \left(g\frac{\rho_l}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} D^{\frac{1}{2}}$$
(1.6)

Όπου D είναι η διάμετρος της σταγόνας, ρ₁ είναι η πυκνότητα του νερού σε υγρή φάση, ρ είναι η πυκνότητα του αέρα, k η αδιάστατη σταθερά και g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Επιπρόσθετα, οι εξισώσεις (1.7) και (1.8) αποτελούν τις εξισώσεις του σχήματος Kessler (Kessler, 1974).

$$\frac{\partial M_{\rm r}}{\partial t} = -(V+w)\frac{\partial M_{\rm r}}{\partial z} - M_{\rm r}\frac{\partial V}{\partial z} + M_{\rm r}w\frac{\partial \ln \rho}{\partial z} + AC + CC - EP - k_5M_{\rm r}$$
(1.7)

$$\frac{\partial m_c}{\partial t} = -w \frac{\partial m_c}{\partial z} + wG + M_r \frac{\partial V}{\partial z} + m_c w \frac{\partial \ln \rho}{\partial z} - AC - CC + EP - k_5 (m_c - m_e)$$
(1.8)

Όπου V η ταχύτητα πτώσης των σταγονιδίων, w η κατακόρυφη ταχύτητα του αέρα, ρ η πυκνότητα του αέρα, G η συνάρτηση συμπύκνωσης, m_e το έλλειμμα κορεσμού και k_5 μια σταθερά. Επίσης, οι όροι AC, CC και EP εκφράζουν τις μικροφυσικές διεργασίες που λαμβάνονται υπόψη στο εν λόγω σχήμα. Αυτές είναι η συμπύκνωση (condensation), η συλλογή (collection of cloud) και η εξάτμιση (evaporation) των σταγόνων αντίστοιχα (Kessler, 1974).

Παρόλο που το σχήμα του Kessler για δημιουργία βροχής από θερμά νέφη θεωρείται απλό, δεν μπορεί να περιγράψει όλες τις φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν στα νέφη. Από το συγκεκριμένο σχήμα δημιουργήθηκαν πολύπλοκες προσεγγιστικές παραμετροποιήσεις, στη μικροφυσική των νεφών, οι οποίες χρησιμοποιούνται σήμερα στα σύγχρονα μετεωρολογικά μοντέλα.

2.5.2. Σχήμα Purdue Lin (PLin)

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Πρόκειται για ένα αρκετά εξελιγμένο και πολύπλοκο σχήμα μικροφυσικής, το οποίο είναι ιδανικό, για έρευνα και για πραγματικές προσομοιώσεις υψηλής χωρικής

διακριτοποίησης (Skamarock et al., 2008). Το PLin ανήκει στην κατηγορία των single-moment σχημάτων, επομένως, μπορεί να προγνώσει την αναλογία μίγματος από έξι διαφορετικές κατηγορίες (6 class) υδρομετεώρων που αναφέρονται παρακάτω, συμπεριλαμβάνοντας όλες τις φάσεις του νερού στην ατμόσφαιρα:

q_v υδρατμούς,

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- q_c νερό των νεφών,
- q_r βροχοσταγόνες,
- q_i παγοκρυστάλλους μέσα στο νέφος,
- q_s χιόνι,
- q_g graupel.



Σχήμα 2.3. Διάγραμμα ροής του σχήματος μικροφυσικής PLin (από Dudhia J., 2010).

Το σχήμα αυτό αναπτύχθηκε από τους Lin et al., (1983) και Rutledge and Hobbs (1984), με κάποιες τροποποιήσεις στον αλγόριθμο από τους Tao et al., (1989), όσον αφορά στη διαδικασία κορεσμού (saturation adjustment) και την καθίζηση του πάγου (ice sedimentation). Επιπρόσθετα, έχει εφαρμοστεί σε μετεωρολογικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού, όπως το WRF από τις αρχικές του κιόλας εκδόσεις (Chen and Sun, 2002).

Σύμφωνα με τους Lin et al., (1983), οι προγνωστικές εξισώσεις της διατήρησης της αναλογίας μίγματος όλων των προαναφερθέντων υδρομετεώρων στο συγκεκριμένο σχήμα είναι οι ακόλουθες:

$$\frac{p}{2} = -\nabla \cdot q_{np} + \nabla \cdot K_h \nabla q_{np} - P_R - P_S - P_G , \qquad (1.9)$$

$$\frac{\partial q_r}{\partial t} = -\nabla \cdot q_r + \nabla \cdot K_m \nabla q_r + P_R + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (V_R q_r \rho) , \qquad (1.10)$$

$$\frac{\partial q_s}{\partial t} = -\nabla \cdot q_s + \nabla \cdot K_m \nabla q_s + P_s + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (V_S q_s \rho) , \qquad (1.11)$$

$$\frac{\partial q_g}{\partial t} = -\nabla \cdot q_g + \nabla \cdot K_m \nabla q_g + P_G + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (V_G q_g \rho) , \qquad (1.12)$$

όπου: $q_{np} = q_c + q_i + q_v$, K_h και K_m είναι οι συντελεστές τυρβώδους διάχυσης για τη θερμότητα και την ορμή αντίστοιχα, V_R , V_S και V_G είναι η ταχύτητα πτώσης των βροχοσταγόνων, του χιονιού και των graupel, ενώ P_R , P_S και P_G ο ρυθμός παραγωγής βροχής, χιονιού και των graupel, αντίστοιχα (Lin et al., 1983).

^μηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

∂q_n

∂t

Η κατανομή μεγέθους των υδρομετεώρων δίνεται από τις εξισώσεις (1.13-1.15), (Lin et al., 1983):

$$n_{\rm R}({\rm D}) = n_{0\rm R} \exp\left(-\lambda_{\rm R} {\rm D}_{\rm R}\right), \qquad (1.13)$$

$$n_{\rm S}({\rm D}) = n_{\rm 0S} \exp\left(-\lambda_{\rm S} {\rm D}_{\rm S}\right), \qquad (1.14)$$

$$n_{\rm G}({\rm D}) = n_{\rm 0G} \exp\left(-\lambda_{\rm G} {\rm D}_{\rm G}\right), \qquad (1.15)$$

Επίσης, η παράμετρος της κλίσης (λ) για τη βροχή, το χιόνι και το μαλακό χαλάζι είναι η εξής (Lin et al., 1983):

$$\lambda_{\rm R} = \left(\frac{\pi \rho_{\rm w} n_{0\rm R}}{\rho q_{\rm r}}\right)^{0.25}, \qquad (1.16)$$

$$\lambda_{\rm S} = \left(\frac{\pi \rho_{\rm S} n_{\rm 0S}}{\rho q_{\rm s}}\right)^{0.25},\tag{1.17}$$

$$\lambda_{\rm G} = \left(\frac{\pi \rho_{\rm G} n_{\rm 0G}}{\rho q_{\rm g}}\right)^{0.25},\tag{1.18}$$

Αντίστοιχα, και οι τελικές τους ταχύτητες V_R , V_S και V_G , δίδονται από τις σχέσεις:

$$V_{\rm R} = \frac{\alpha \Gamma(4+b)}{6\lambda_{\rm R}^b} \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{1/2}, \qquad (1.19)$$

$$V_{\rm S} = \frac{c\Gamma(4+b)}{6\lambda_{\rm S}^{\rm b}} (\frac{\rho_0}{\rho})^{1/2} , \qquad (1.20)$$

- 22 -



$$V_{\rm G} = \frac{\Gamma(4.5)}{6\lambda_{\rm G}^{0.5}} \left(\frac{4g\rho_{\rm g}}{3C_{\rm D}\rho}\right)^{1/2}, \qquad (1.21)$$

όπου α, b και c είναι σταθερές, Γ η συνάρτηση γάμμα, C_D ο συντελεστής τριβής και ρ_0 η πυκνότητα του αέρα στην επιφάνεια, η οποία λαμβάνεται ίση με 1.29 kg m⁻³ (Lin et al., 1983).

Οι τελικές ταχύτητες των υδρομετεώρων απεικονίζονται στο Σχήμα 2.4. Συγκεκριμένα, τα σωματίδια πάγου (χαλάζι και graupel) εξαιτίας των μεγάλων τερματικών ταχυτήτων τους, έχουν ως αποτέλεσμα τη ραγδαία αύξηση του υετού. Επιπροσθέτως, χαμηλότερες τελικές ταχύτητες εμφανίζουν οι βροχοσταγόνες και ακόμα περισσότερο οι χιονονιφάδες λόγω της χαμηλότερης πυκνότητάς τους.

Σύμφωνα με τους Jankov et al., (2011), το σχήμα μικροφυσικής PLIN έχει την τάση να υπερεκτιμά σημαντικά τη συνολική βροχόπτωση, όπως επίσης και την έντασή της. Αποτέλεσμα αυτού είναι η παραγωγή ισχυρών τοπικών μέγιστων βροχής (Jankov et al., 2007, Lin and Colle, 2009).



Σχήμα 2.4. Ταχύτητες πτώσης των βροχοσταγόνων, του χιονιού και του χαλαζιού (από Lin et al., 1983).

2.5.3. Σχήμα WRF Single-Moment 3-class (WSM3)

Το WRF single-moment 3-class (WSM3) σχήμα μικροφυσικής αναπτύχθηκε από τους Hong et al., (2004). Πρόκειται για ένα απλό σχήμα μικροφυσικής, που παραμετροποιεί μηχανισμούς ανάπτυξης, τόσο θερμών, όσο και ψυχρών νεφών (ice sedimentation). Μπορεί να χαρακτηριστεί και ως simple-ice scheme, καθώς δύναται η δυνατότητα επιλογής διεργασιών που συμβαίνουν μόνο σε ψυχρά νέφη, όταν η θερμοκρασία είναι μικρότερη από 0°C.

Διαφέρει από όλα τα άλλα σχήματα μικροφυσικής, καθώς η εξίσωση της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων του πάγου (1.22) που περιλαμβάνει, είναι διαγνωστική και εξαρτάται από την ποσότητα του περιεχόμενου πάγου στο νέφος και όχι από τη θερμοκρασία (Skamarock et al., 2008).

$$N_I(m^{-3}) = c(\rho q_I)^d, (1.22)$$

Όπου c και d είναι συντελεστές που εξαρτώνται από το είδος των παγοκρυστάλλων.

Περιλαμβάνει τρία είδη/κλάσεις υδρομετεώρων (Σχήμα 2.6):

• $q_v \upsilon \delta \rho \alpha \tau \mu o \upsilon \varsigma$

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- q_c neró twn nerwin / q_i pagokrustálloi
- $q_r \beta \rho$ do tand the set of t



Σχήμα 2.6. Διάγραμμα ροής του σχήματος μικροφυσικής WSM3 (από Dudhia J., 2010).

Σύμφωνα με τον Dudhia (1989), τα νέφη θεωρείται ότι περιέχουν νερό σε υγρή φάση κάτω από το επίπεδο ψύξης (T>0 °C) και νερό σε στερεά φάση πάνω από το επίπεδο παγοποίησης (T<0°C). Τέλος, το WSM3 δεν λαμβάνει υπόψη συνθήκες υπέρψυξης και θεωρείται ιδανικό για χωρικές διακριτοποιήσεις μέσης κλίμακας.

2.5.4. Σχήμα WRF Single-Moment 5-class (WSM5)

Μια αναβαθμισμένη έκδοση του WSM3 αποτελεί το σχήμα WSM5 (mixed phase). Ανήκει στην κατηγορία των single-moment σχημάτων, καθώς μπορεί να προγνώσει την αναλογία μίγματος από πέντε κατηγορίες (5 class) υδρομετεώρων (Σχήμα 2.7). Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί τα ίδια είδη υδρομετεώρων με το WSM3 με τη διαφορά ότι εδώ ταξινομούνται σε πέντε κλάσεις και όχι σε τρεις:

q_v υδρατμούς

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- q_c νερό των νεφών
- q_r βροχοσταγόνες
- q_i παγοκρυστάλλους μέσα στο νέφος
- q_s χιόνι

Με αυτόν τον τρόπο, διαχειρίζονται συνθήκες υπέρψυξης και διαδικασίες μικτής φάσης, (Σχήμα 2.1: στα νέφη που βρίσκονται στο στρώμα ανάμεσα στους 0°C και - 15°C), ενώ επιτρέπει το σταδιακό λιώσιμο των παγοκρυστάλλων κάτω από το επίπεδο τήξης (Skamarock et al., 2008).



Σχήμα 2.7. Διάγραμμα ροής του σχήματος μικροφυσικής WSM5 (από Dudhia J., 2010).

Το εν λόγω σχήμα αναπτύχθηκε από τους Hong et al., (2004) και Hong and Lim (2006). Επιπρόσθετα, κάποιες τροποποιήσεις όσον αφορά τη διαδικασία κορεσμού σε νερό και πάγο έγιναν από τους Dudhia (1989) και Hong et al., (1998). Θεωρείται ιδανικό για χωρικές διακριτοποιήσεις μεταξύ μέσης κλίμακας και μερικών χιλιομέτρων πλέγματα (cloud resolving grids).

2.5.5. Σχήμα WRF Single-Moment 6-class (WSM6)

Το σχήμα μικροφυσικής WSM6 έχει παρόμοια δομή με το WSM5, με τη διαφορά ότι περιέχει έξι κλάσεις υδρομετέωρων (Σχήμα 2.8), που συνοπτικά αναφέρονται παρακάτω, ενώ η αναλυτική περιγραφή του θα ακολουθήσει σε επόμενο κεφάλαιο.

q_v υδρατμούς

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- q_c νερό των νεφών
- q_r βροχοσταγόνες
- q_i παγοκρυστάλλους μέσα στο νέφος
- q_s χιόνι
- q_g graupel



Σχήμα 2.8. Διάγραμμα ροής του σχήματος μικροφυσικής WSM6 (από Dudhia J., 2010).

Είναι ιδανικό για αριθμητικές προσομοιώσεις υψηλής χωρικής διακριτοποίησης, ενώ από τα τρία WSM σχήματα μικροφυσικής θεωρείται και είναι το πιο κατάλληλο για χωρικές διακριτοποιήσεις που κυμαίνονται μεταξύ μέσης κλίμακας και μερικών χιλιομέτρων (cloud resolving grids), (Hong and Lim, 2006).
2.5.6. Σχήμα Eta Ferrier

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το Eta Ferrier αποτελεί ένα σχήμα μικροφυσικής το οποίο χρησιμοποιείται στην Ελλάδα και διεθνώς, σε αρκετά αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού. Προέρχεται από το ομώνυμο μοντέλο και ενδείκνυται, τόσο για επιχειρησιακές προγνώσεις, όσο και για ερευνητικούς σκοπούς. Συγκεκριμένα εφαρμόζεται στο μοντέλο WRF-ARW που λειτουργεί επιχειρησιακά στον Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του Α.Π.Θ. (http://meteo.geo.auth.gr), στο σύστημα πρόγνωσης καιρού SKIRON που λειτουργεί επιχειρησιακά στην Ομάδα Ατμοσφαιρικών Μοντέλων και Πρόγνωσης Καιρού (http://forecast.uoa.gr) του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (Kallos, 1997), καθώς και στο μοντέλο WRF-NMM που λειτουργεί επιχειρησιακά στο Τμήμα Γεωγραφίας του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου (Κατσαφάδος κ.ά., 2010).

Αν και το σχήμα Ferrier (Ferrier et al., 2002) βασίζεται σε απλές παραμετροποιήσεις, είναι πιο προηγμένο από τα απλά σχήματα μικροφυσικής. Περιέχει προγνωστική εξίσωση για το διαθέσιμο νερό και πάγο του νέφους, η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία στο κάθε επίπεδο του μοντέλου. Επίσης μπορεί να κάνει διάγνωση του ρυθμού σχηματισμού βροχής και/ή χιονιού, που βασίζεται στην ποσότητα των νεφοσταγόνων και των παγοκρυστάλλων του προγνωστικού νέφους. Οι προγνωστικές μεταβλητές που περιέχει το εν λόγω σχήμα είναι τέσσερις και απεικονίζονται στο Σχήμα 2.9.

- αιωρούμενα υδροσταγονίδια,
- βροχή,
- μεγάλους παγοκρυστάλλους (χιόνι, χιονόνερο, graupel) και
- μικρούς παγοκρυστάλλους (αιωρούμενοι παγοκρύσταλλοι που εξατμίζονται γρήγορα όταν βρεθούν σε περιβάλλον με συνθήκες υγρασίας κάτω του κορεσμού σε σχέση με τον πάγο). (suspended cloud ice, evaporates quickly in air subsaturated with respect to ice)



Σχήμα 2.9. Διάγραμμα ροής του σχήματος μικροφυσικής Eta Ferrier (από Dudhia J.,2010).

Πιο συγκεκριμένα, το σχήμα Ferrier εκτιμά προγνωστικά τα συνολικό ποσό συμπύκνωσης (q_{tc}) και την αναλογία μίγματος των υδρατμών, τα οποία μεταφέρονται από τον μέσο άνεμο (Skamarock et al., 2008). Όταν εφαρμόζεται ο αλγόριθμος, τα συνολικά συμπυκνώματα διαχωρίζονται σε αιωρούμενα υδροσταγονίδια, βροχή, παγοκρυστάλλους και χιόνι ($q_{tc}=q_c+q_r+q_i+q_s$).

Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του σχήματος είναι τα εξής: (πηγή: http://meted.ucar.edu/nwp/pcu2/etapcp1.htm)

- Επιτρέπεται η αλλαγή του μεγέθους των υδρομετεώρων (αύξηση και μείωση).
- Η πυκνότητα, όλων των ειδών των παγοκρυστάλλων που χρησιμοποιείται έχει σταθερή τιμή.
- Οι τερματικές ταχύτητες των υδρομετεώρων εξαρτώνται από το μέγεθος και το είδος τους.
- Περιλαμβάνει τη διαδικασία συλλογής, η οποία συμβαίνει όταν τα υδρομετέωρα κατά την πτώση τους συγκρούονται και συνενώνονται με άλλα.
- Συμπεριλαμβάνει τη μικτή φάση. Οι διεργασίες της μικτής φάσης λαμβάνουν χώρα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των -30 °C, ενώ ο κορεσμός της ατμόσφαιρας ως προς τον πάγο σε θερμοκρασίες χαμηλότερες. Επιπρόσθετα, η μικτή φάση περιλαμβάνει διεργασίες στεφανώματος (riming) και το διαχωρισμό των βροχοσταγόνων από τους παγοκρυστάλλους που λιώνουν.
- Τέλος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Ryan (1996) το μέσο μέγεθος των παγοκρυστάλλων αποτελεί συνάρτηση της θερμοκρασίας. Όταν αυτή είναι κάτω

των -10 °C τότε, σύμφωνα με τα παραπάνω χαρακτηριστικά, δεν επιτρέπεται η πρόγνωση φαινομένων όπως το χαλάζι και παγωμένη βροχή.

2.5.7. Σχήμα Thompson

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το σχήμα παραμετροποίησης των Thompson et al., (2008) αποτελεί ένα νέο και πιο εξελιγμένο συγκριτικά με των Thompson et al., (2004) σχήμα, προσεγγιστικών παραμετροποιήσεων (Bulk Microphysical Parameterization - BMP). Αναπτύχθηκε με σκοπό τη χρήση του στο WRF και σε άλλα μέσης κλίμακας αριθμητικά μοντέλα (Skamarock et al., 2008).

Πρόκειται για ένα σχήμα μικροφυσικής που περιέχει υδρομετέωρα όπως χιόνι, graupel και πάγο, ενώ είναι σε πιο αναπτυγμένη μορφή ως προς την παραμετροποίηση του χιονιού. Συγκεκριμένα, το νέο σχήμα περιλαμβάνει μια πληθώρα από βελτιώσεις, τόσο στις παραμετροποιήσεις της φυσικής, όσο και στον υπολογιστικό κώδικα του μοντέλου, ο οποίος είναι πιο ανεπτυγμένος. Επίσης, πιο εξελιγμένες είναι και οι τεχνικές χρήσης των σχημάτων των φασματικών παραμετροποιήσεων, με τη χρήση πινάκων (Skamarock et al., 2008).

Διαφέρει σε σχέση με άλλα BMP σχήματα, καθώς η κατανομή του μεγέθους του χιονιού εξαρτάται από το περιεχόμενο του νέφους σε πάγο και από τη θερμοκρασία, ενώ η κατανομή του μεγέθους περιγράφεται από το άθροισμα της εκθετικής και της Γάμμα κατανομής (Skamarock et al., 2008).

Επιπρόσθετα, στο εν λόγω σχήμα μικροφυσικής, το σχήμα του χιονιού θεωρείται μη σφαιρικό και με μεταβλητή πυκνότητα (bulk density), η οποία μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με τη διάμετρο, έτσι όπως προέκυψε από ένα πλήθος παραμετροποιήσεων. Σε αντίθεση με τα άλλα BMP σχήματα, το χιόνι θεωρείται ότι έχει σφαιρικό σχήμα και σταθερή πυκνότητα (Skamarock et al., 2008).

Επομένως, πρόκειται για ένα πολύπλοκο σχήμα το οποίο είναι ιδανικό για αριθμητικές προσομοιώσεις υψηλής χωρικής διακριτοποίησης.

Το σχήμα της μικροφυσικής των νεφών Goddard ανήκει στην κατηγορία των single-moment σχημάτων και βασίζεται στο σχήμα των Lin et al., (1983) και Rutledge and Hobbs (1984). Ενσωματώθηκε στο WRF το 2008 και έκτοτε χρησιμοποιείται σε επιχειρησιακές προγνώσεις και στην έρευνα.

Μπορεί να προγνώσει την αναλογία μίγματος από έξι κατηγορίες υδρομετεώρων, συμπεριλαμβάνοντας όλες τις φάσεις του νερού στην ατμόσφαιρα (2-class Liquid and 3-class Ice) (Σχήμα 2.10):

- q_c περιέχων ύδωρ στο νέφος,
- $q_r \beta \rho o costagone \zeta$,
- q_i παγοκρυστάλλους μέσα στο νέφος,
- q_s χιόνι και

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

2.5.8. Σχήμα Goddard

• q_g graupel / q_h χαλάζι.



Σχήμα 2.10. Διάγραμμα ροής του σχήματος μικροφυσικής Goddard (από Tao and Simpson, 1993).

Το Goddard (bulk microphysical scheme) τροποποιήθηκε από τους Tao et al. (2003) και Lang et al. (2007), έχοντας ως σκοπό τη μείωση των υπερεκτιμημένων (overestimated) συγκεντρώσεων των graupel, μέσα στην περιοχή σχηματισμού του άκμονα των καταιγιδοφόρων νεφών, ενώ ταυτόχρονα θέλησαν να επιτύχουν και την καλύτερη διαχείριση των συνθηκών κορεσμού. Συγκεκριμένα, στο σχήμα Goddard

υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης νέων τεχνικών διαχείρισης συνθηκών κορεσμού (Tao et al., 1989). Αναλυτική περιγραφή του θα ακολουθήσει σε επόμενη παράγραφο.

2.6 DOUBLE MOMENT ΣΧΗΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟΦΥΣΙΚΗΣ

2.6.1. Σχήμα Morrison

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το σχήμα Morrison, (Morrison et al., 2009) ανήκει στην κατηγορία των doublemoment σχημάτων και βασίζεται στο σχήμα μικροφυσικής των Morrison et al., (2005) και των Morrison and Pinto (2006). Αποτελείται από προγνωστικές εξισώσεις, τόσο για την αναλογία μίγματος των υδρομετεώρων, όσο και για την αριθμητική συγκέντρωση (Number Concentration) της κάθε κλάσης. Περιλαμβάνει πέντε είδη / κλάσεις υδρομετεώρων, όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 2.11.

- q_c περιέχων ύδωρ στο νέφος,
- q_r βροχοσταγόνες,
- q_i παγοκρυστάλλους μέσα στο νέφος,
- q_s χιόνι και
- q_g graupel / q_h χαλάζι.



Σχήμα 2.11. Διάγραμμα ροής του σχήματος μικροφυσικής Morrison (double moment), (από Morrison et al., 2005).

Πρόκειται για ένα σχήμα μικροφυσικής που περιέχει στο σύνολό του δέκα προγνωστικές εξισώσεις (πέντε εξισώσεις για την αναλογία μίγματος των υδρομετεώρων και πέντε για την αριθμητική συγκέντρωση κάθε κλάσης). Τα doublemoment σχήματα επιτυγχάνουν καλύτερη πρόγνωση καιρού, καθώς επίσης και καλύτερη διαχείριση των κατανομών μεγέθους των υδρομετεώρων. Συγκεκριμένα, η κατανομή μεγέθους των κλάσεων N_D περιγράφεται από τη γ-κατανομή (Gamma distribution) (1.23).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

$$N(D) = N_0 D^{\mu} e^{-\lambda D} , \qquad (1.23)$$

όπου N₀, λ και μ είναι ο μέγιστος αριθμός σωματιδίων ανά όγκο (intercept parameter), η παράμετρος της κλίσης και η παράμετρος του σχήματος της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων, αντίστοιχα. Πιο αναλυτικά, η παράμετρος της κλίσης δίνεται από τη σχέση (1.24) και η μέγιστη συγκέντρωση των σωματιδίων από την (1.25).

$$\lambda = \left[\frac{cN\Gamma(\mu+d+1)}{q\Gamma(\mu+1)}\right]^{\frac{1}{d}},$$
(1.24)

$$N_0 = \frac{N\lambda^{\mu+1}}{\Gamma(\mu+1)},$$
 (1.25)

Επίσης, όπου Γ είναι η συνάρτηση γάμμα (Euler gamma function) και οι παράμετροι c και d υπολογίζονται από τη σχέση της μάζας των υδρομετεώρων. Η μάζα για όλα τα είδη υδρομετεώρων δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$m = cD^d \quad , \tag{1.26}$$

Σύμφωνα με τους Reisner et al., (1998), στο εν λόγω σχήμα όλα τα είδη των υδρομετεώρων έχουν σχήμα σφαιρικό και μεταβλητή πυκνότητα (bulk density), όσον αφορά τον πάγο.

Τέλος, το σχήμα μικροφυσικής Morrison (double-moment) είναι ιδανικό, τόσο για πραγματικές, όσο και για εξιδανικευμένες μελέτες (case studies) που καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος συνθηκών.

2.6.2. Σχήμα WRF Double-Moment WDM5-class και 6-class

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το WRF Double-Moment–5 σχήμα της μικροφυσικής των νεφών (όμοια και το WDM-6), ανήκει στην ίδια έκδοση με το WSM-5 (WSM-6), έχοντας ως διαφορά το γεγονός ότι το WDM-5 (WDM-6) σχήμα διαχειρίζεται τα θερμά νέφη ως doublemoment σχήμα. Επομένως, για την ανάπτυξη του WDM-5 (WDM-6), εκτός από τις προγνωστικές εξισώσεις της αναλογίας μίγματος των υδρομετεώρων για κάθε κλάση, προστεθήκαν στο WSM-5 (WSM-6) σχήμα και οι προγνωστικές εξισώσεις για τα αιωρούμενα σωματίδια CCN, τις συγκεντρώσεις (Number Concentrations) για τις νεφοσταγόνες και τις βροχοσταγόνες (Hong et al., 2004, Hong and Lim 2006). Το WDM6 σχήμα μικροφυσικής θα αναλυθεί λεπτομερέστερα σε επόμενη παράγραφο.

Συμπερασματικά, τα single moment σχήματα είναι απλούστερα και πιο εύχρηστα σε σχέση με τα double moment, καθώς περιέχουν προγνωστικές εξισώσεις μόνο για την αναλογία μίγματος των υδρομετεώρων. Όμως, παρά το γεγονός αυτό, τα double moment σχήματα, αν και πολυπλοκότερα, προσομοιώνουν καλύτερα τη βροχόπτωση στα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης, αφού περιέχουν προγνωστικές εξισώσεις και για την αναλογία μίγματος των υδρομετεώρων και για την αριθμητική τους συγκέντρωση.

2.7 ANAAYTIKH ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ TOY WRF SINGLE-MOMENT 6-CLASS (WSM6)

Το σχήμα μικροφυσικής WSM6, όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο, περιέχει έξι κλάσεις υδρομετεώρων, καθώς περιλαμβάνει και την προγνωστική εξίσωση της αναλογίας μίγματος (single moment) των graupel (εξίσωση, 1.27). Οι νέοι όροι που σχετίζονται με τα graupel προέρχονται από αναφορές των Lin et al., (1983) και των Rutledge and Hobbs (1984).

$$\frac{\partial q_G}{\partial t} = -\vec{V} \nabla_3 q_G - \frac{q_G}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\rho V_G) + S_G , \qquad (1.27)$$

Ο πρώτος και ο δεύτερος όρος της εξίσωσης (1.27) εκφράζουν την τρισδιάστατη θερμική ανωμεταφορά και καθίζηση (advection and sedimentation) των graupel, ενώ, S_G είναι οι πηγές ή καταβόθρες των graupel (Hong and Lim, 2006).

Στο διάγραμμα του Σχήματος 2.12 απεικονίζεται η δομή του WSM6, όπως αυτή παρουσιάζεται από τους Hong and Lim, (2006). Οι εξισώσεις της κάθε διαδικασίας

αναφέρονται αναλυτικά στις εργασίες τους. Αποτελείται κυρίως από τους μηχανισμούς παραγωγής του χιονιού, των graupel και της βροχόπτωσης. Επίσης, όλες οι διαδικασίες που απεικονίζονται οδηγούν σε μετατροπές και αλλαγές φάσεων των υδρομετεώρων.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 2.12. Διάγραμμα ροής του σχήματος μικροφυσικής WSM6 (από Hong and Lim, 2006). Οι διεργασίες/παραμετροποιήσεις που παρουσιάζονται με το κόκκινο (μπλε) χρώμα όροι με το κόκκινο (μπλε) χρώμα συμβαίνουν όταν η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη (μικρότερη) του μηδενός, ενώ οι μηχανισμοί με το μαύρο χρώμα είναι συνεχώς ενεργοί.

Η κατανομή μεγέθους των graupel και της βροχής δίνεται από τις σχέσεις:

$$n_{G}(D)dD_{G}[m^{-4}] = n_{0G}exp(-\lambda_{G}D_{G})dD_{G}, (1.28)$$

$$n_{R}(D_{R}) = N_{0R}exp(-\lambda_{R}D_{R}), (1.29)$$

όπου $n_G(D)dD_G(m^{-4})$, ο αριθμός των σωματιδίων graupel ανά κυβικό μέτρο μεταξύ των διαμέτρων D_G και $D_G + dD_G$ και $\lambda_G(m^{-1})$.

Η παράμετρος της κλίσης δίνεται από την ακόλουθη σχέση:



$$\lambda_{\rm G}[{\rm m}^{-1}] = \left(\frac{\pi \rho_{\rm G} {\rm n}_{\rm 0G}}{\rho {\rm q}_{\rm G}}\right)^{0.25}, \qquad (1.30)$$

όπου $n_{0G} = 4 \times 10^6 \text{ m}^{-4}$ σύμφωνα με τους Houze et al. (1993) και ρ_G η πυκνότητα των graupel.

Παρά το γεγονός ότι το εν λόγω σχήμα (Hong and Lim, 2006) βασίζεται στις παραμετροποιήσεις του PLin, τα δύο σχήματα δεν εμφανίζουν μόνο ομοιότητες, αλλά και διαφορές. Συγκεκριμένα, η παραμετροποίηση της μικροφυσικής των παγοκρυστάλλων (Hong et al., 2004) και η ταχύτητα πτώσης του χιονιού και των graupel, (Dudhia et al., 2008) διαφέρουν σημαντικά στα σχήματα WSM6 και PLin, αντίστοιχα.

Το σχήμα WSM6 αποτελεί μια νέα μέθοδο αναπαράστασης των ταχυτήτων πτώσης για το χιόνι και τα graupel στη μικτή φάση του νέφους. Σύμφωνα με τους Dudhia et al., (2008) και στα δυο είδη (χιόνι και graupel) εφαρμόζεται η ίδια τερματική ταχύτητα στις διαδικασίες καθίζησης και συσσώρευσης (sedimentation and accretion processes), η οποία εξαρτάται από την αναλογία μίγματος των ίδιων των υδρομετεώρων (Dudhia et al., 2008).

Συγκεκριμένα η τερματική ταχύτητα V_{DG} των σωματιδίων graupel, διαμέτρου D, δίνεται από τη σχέση (1.31) σύμφωνα με τους Locatelli and Hobbs (1974).

$$V_{DG}[ms^{-1}] = a_G D_G^{b_G} \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{1/2}, \qquad (1.31)$$

Οι Lin et al., (1983) και οι Rutledge and Hobbs (1984) αναφέρουν ότι η τερματική ταχύτητα των graupel δίνεται από τη σχέση (1.32).

$$V_{G}[ms^{-1}] = \frac{a_{G}\Gamma(4+b_{G})}{6} \left(\frac{\rho_{0}}{\rho}\right)^{1/2} \frac{1}{\lambda_{G}^{b_{G}}}, \qquad (1.32)$$

όπου α_g και b_g είναι προσδιορισμένοι εμπειρικά συντελεστές, που παίρνουν τις τιμές 330 και 0.8 αντίστοιχα (για graupel), σύμφωνα με το σχήμα παραμετροποίησης της μικροφυσικής WSM6 (Hong et al., 2009). Μια αύξηση στην τιμή της πυκνότητας των graupel (ρ_g), διατηρώντας όλους τους άλλους παράγοντες/όρους σταθερούς, έχει ως

αποτέλεσμα η παράμετρος της κλίσης λ_g (1.30) τους να αυξηθεί και η μέση τιμή της τερματικής ταχύτητάς τους να μειωθεί.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Επιπροσθέτως, σύμφωνα με τους Skamarock et al., (2008), οι διαδικασίες παγοποίησης και τήξης (freezing και melting) λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό των τερματικών ταχυτήτων σε όλα τα WSM (3,5,6) σχήματα μικροφυσικής.

Όσον αφορά τις προσομοιώσεις μέσης κλίμακας, τα σχήματα WSM3, WSM5 και WSM6 εμφανίζουν μικρές διαφορές, ενώ μεγαλύτερες και εξέχουσας σημασίας διαφορές εμφανίζονται σε χωρικές διακριτοποιήσεις μερικών χιλιομέτρων (cloud resolving grids).

Αξίζει να αναφερθεί ότι, το σχήμα WSM6 είναι ιδανικό για αριθμητικές προσομοιώσεις υψηλής χωρικής διακριτοποίησης, ενώ από τα τρία WSM σχήματα μικροφυσικής είναι το πιο κατάλληλο για χωρικές διακριτοποιήσεις που κυμαίνονται μεταξύ μέσης κλίμακας και μερικών χιλιομέτρων (cloud resolving grids), (Hong and Lim, 2006).

2.8 ANAAYTIKH ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ TOY GODDARD CUMULUS ENSEMBLE (GCE)

Το σχήμα της μικροφυσικής των νεφών Goddard όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 2.5.8, προέρχεται από το ομώνυμο μοντέλο Goddard Cumulus Ensemble (GCE) συμφώνα με τις δημοσιεύσεις των Tao and Simpson, (1993) και Tao et al., (2003). Το μοντέλο GCE, αναπτύχθηκε και εξελίχθηκε στο Goddard Space Flight Center της NASA τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Περιλαμβάνει: 1) ένα μοντέλο με χωρική διακριτοποίηση μερικών χιλιόμετρων (cloud-resolving model - CRM), 2) ένα περιοχικό μοντέλο (regional-scale model), το WRF και 3) μια σύζευξη των μοντέλων CRM-GCM (μοντέλο γενικής κυκλοφορίας που είναι γνωστό ως Goddard Multi-scale Modeling Framework ή MMF).

Στο Σχήμα 2.13 απεικονίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά του Goddard Cumulus Ensemble (GCE) model, όπως αυτά παρουσιάζονται από τους Tao et al., (2009). Οι Simpson and Tao (1993) and Tao et al.,(2003) ερευνούν τις εφαρμογές του μοντέλου GCE για την καλύτερη, δυνατή ανάπτυξη και κατανόηση των φυσικών διεργασιών της βροχόπτωσης.



Σχήμα 2.13. Διάγραμμα ροής των κύριων χαρακτηριστικών συνιστωσών του μοντέλου της NASA συζευγμένο με το WRF (components of the NASA unified WRF). Με μπλε απεικονίζονται οι φυσικές διεργασίες (physical processes (packages) που αναπτύχθηκαν στην NASA και με ανοιχτό πράσινο ο δυναμικός πυρήνας του μοντέλου WRF. Όπου COCART αναπαρίσταται το μοντέλο Goddard Chemistry Aerosol Radiation and Transport (από Tao et al., 2009).

Το Goddard (bulk microphysical scheme) τροποποιήθηκε από τους Tao et al., (2003) και Lang et al. (2007), έχοντας ως σκοπό τη μείωση των υπερεκτιμημένων (overestimated) συγκεντρώσεων των graupel, μέσα στην περιοχή σχηματισμού του άκμονα των καυαιγιδοφόρων νεφών, ενώ ταυτόχρονα θέλησαν να επιτύχουν και την καλύτερη διαχείριση των συνθηκών κορεσμού. Συγκεκριμένα, στο σχήμα Goddard υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης νέων τεχνικών διαχείρισης συνθηκών κορεσμού (Tao et al., 1989). Οι τεχνικές αυτές παρέχονται στο μοντέλο, για να εξασφαλίσουν ότι ο υπερκορεσμός (υποκορεσμός) δε μπορεί να υπάρξει σε ένα σημείο του πλέγματος (grid point) που είναι χωρίς νέφωση (με νέφωση). Επίσης, οι τεχνικές κορεσμού αποτελούν μία από τις τελευταίες μικροφυσικές διεργασίες που πρέπει να

υπολογίσει το μοντέλο, αφού πρώτα γίνει η αξιολόγηση των φυσικών διεργασιών, όπως είναι η εξάτμιση (evaporation) της βροχής και η εναπόθεση ή εξάχνωση (deposition or sublimation) του χιονιού, των graupel, ή του χαλαζιού.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Δίνεται επίσης και η δυνατότητα του υπολογισμού των μικροφυσικών διεργασιών βάση της θερμοδυναμικής τους κατάστασης, που δεν περιλαμβάνουν τις διαδικασίες τήξης (melting), εξάτμισης (evaporation), ή εξάχνωσης (sublimation).

Ανήκει στην κατηγορία των single-moment σχημάτων και βασίζεται στις παραμετροποιήσεις των Lin et al., (1983) και Rutledge and Hobbs (1984). Ενσωματώθηκε στο WRF το 2008 και έκτοτε χρησιμοποιείται σε επιχειρησιακές προγνώσεις και στην έρευνα.

Όπως έχει προαναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο, μπορεί να προγνώσει την αναλογία μίγματος από έξι κατηγορίες υδρομετεώρων, συμπεριλαμβάνοντας όλες τις φάσεις του νερού στην ατμόσφαιρα.

Το Goddard είναι ένα ευέλικτο σχήμα μικροφυσικής, το οποίο δίνει τη δυνατότητα τεσσάρων διαφορετικών επιλογών, οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν στο WRF. Αρχικά, ενός σχήματος μόνο με παγοκρυστάλλους και χιόνι (2Ice scheme). Η επιλογή αυτή μπορεί να είναι απαραίτητη για αριθμητικές προσομοιώσεις υψηλής χωρικής διακριτοποίησης, με απόσταση ανάμεσα στα σημεία πλέγματος dx > 5 km (Skamarok et al., 2008). Το 2-class ice scheme είναι ιδανικό για εφαρμογές κυρίως το χειμώνα και για μετωπική θερμική ανωμεταφορά (frontal convection). Μια δεύτερη επιλογή αποτελεί το σχήμα που εφαρμόζεται μόνο σε θερμά νέφη (2Ice-Liquid scheme) και περιέχει μόνο νεφοσταγόνες και βροχή.

Επιπρόσθετα, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μεταξύ των graupel ή του χαλαζιού, ως 3η κατηγορία πάγου (McCumber et al., 1991). Συγκεκριμένα, επιτρέπεται η επιλογή ενός σχήματος μόνο με παγοκρυστάλλους, χιόνι και graupel (3 Ice-graupel) και τέλος, ενός σχήματος μόνο με παγοκρυστάλλους, χιόνι και χαλάζι (3Ice-hail).

Στο διάγραμμα του Σχήματος 2.14 απεικονίζεται η δομή του σχήματος Goddard όπως αυτή παρουσιάζεται από τους Tao and Simpson, (1993). Αποτελείται από ένα πολύπλοκο σύνολο μικροφυσικών διεργασιών που περιγράφονται στον Πίνακα 2, ενώ έμφαση θα δοθεί στους μηχανισμούς παραγωγής του χιονιού, των graupel/hail και της βροχόπτωσης.



Σχήμα 2.14. Διάγραμμα ροής του σχήματος μικροφυσικής Goddard με τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ των graupel ή του χαλαζιού, ως 3η κατηγορία πάγου (Tao and Simpson, 1993, after Lin et al, 1983).

Πιο αναλυτικά, για την παραγωγή του χιονιού συμβαίνουν οι εξής παραμετροποιήσεις: ο μετασχηματισμός των παγοκρυστάλλων σε χιόνι (autoconversion), η συλλογή/επισώρευση (accretion) των υδροσταγονιδίων και των παγοκρυστάλλων του νέφους από το λιωμένο χιόνι που πέφτει, η αύξηση του ρυθμού παραγωγής του χιονιού μέσω εναπόθεσης υδρατμών (deposition) και τέλος η τήξη (melting) των χιονονιφάδων κάτω από το επίπεδο ψύξης.

Αντίστοιχα, για τη δημιουργία των graupel/hail απαιτείται ο μετασχηματισμός (autoconversion) των χιονονιφάδων σε graupel (μαλακό χαλάζι), η συλλογή/επισώρευση (accretion) των άλλων μορφών υετού κατά την πτώση των

λιωμένων graupel, η αύξηση του ρυθμού παραγωγής των graupel μέσω εναπόθεσης υδρατμών (deposition) και η τήξη (melting) των graupel κάτω από το επίπεδο ψύξης.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τέλος, για το σχηματισμό της βροχής, απαιτείται ο μετασχηματισμός (autoconversion) των νεφοσταγόνων σε βροχή. Η έναρξη της βροχής γίνεται μέσω της σύγκρουσης των νεφοσταγόνων, της συνένωσης και συγχώνευσης (coalescence) των μικρών σταγονιδίων της βροχής με τις νεφοσταγόνες που παρασύρουν κατά τη πτώση τους (accretion) και/ή της ανάπτυξής τους μέσω της διάχυσης.

Πίνακας 2. Μικροφυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο σχήμα Goddard. (από τον Tao et al., 2009). Οι εξισώσεις της κάθε διαδικασίας αναφέρονται αναλυτικά στις εργασίες των Lin et al. (1983), Rutledge and Hobbs (1984), Tao and Simpson (1993), Tao et al. (2003). Όπου de12 και de13 σταθερές που παίρνουν τις τιμές 1 ή 0 και εξαρτώνται από την αναλογία μίγματος των υδρομετεώρων, (Lin et al., 1983).

	Cloud Water (QC)	Rain (QR)	Cloud Ice (QI)	Snow (QS)	Graupel/Hail (QH)
Condensation	CND				
Evaporation	DD	ERN			
Auto-conversion	-PRAUT	+PRAUT			
Accretion	-PRACW	+PRACW			
Deposition DEPOSITION OF QS DEPOSITION OF QG			PIDEP PINT DEP	PSDEP	
Sublimation			=DDI	-PSSUR	
Melting	PIMLT	PSMLT PGMLT	-PIMLT	-PSMLT	-PGMLT
AUTOCONVERSION OF QI TO QS			-PSAUT	PSAUT	
ACCRETION OF QI TO QS			-PSACI	PSACI	
ACCRETION OF QC BY QS (RIMING) (QSACW FOR PSMLT)	-PSACW -QSACW	QSACW		PSACW	
ACCRETION OF QI BY QR			-PRACI	del3*	(1-del3)*
				PRACI	PRACI
ACCRETION OF QR OR QH BY QI		-PIACR		del3*	(1-del3)*
~ ~ ~				PIACR	PIACR
BERGERON PROCESSES FOR QS	-PSFW			PSFW	
BERGERON PROCESSES FOR QS			-PSFI	PSFI	
ACCRETION OF QS BY QH				-PGACS	PGACS
(DGACS,WGACS: DRY AND WET)				-DGACS	DGACS
				-WGACS	WGACS
ACCRETION OF QC BY QH (QGACW	-DGACW				DGACW
FOR PGMLT)	-QGACW				QGACW
ACCRETION OF QI BY QH (WGACI			-DGACI		DGACI
FOR WEI GROWTH)		DOLOD	-WGACI		WGACI
FOR PGMLT)		-DGACR -(1-del)* WGACR -del* WGACR			WGACR
WET GROWTH OF QH					
SHED PROCESS		QGACW		WGACR= PGWET- DGACW- WGACI- WGACS	QGACW
AUTOCONVERSION OF QS TO QH				-PGAUT	PGAUT
FREEZING		-PGFR			PGFR
ACCRETION OF QS BY QR				-PRACS	PRACS
ACCRETION OF QR BY QS (QSACR FOR PSMLT)		-PSACR		del2* PSACR	(1-del2)* PSACR
HOMOGENEOUS FREEZING OF QC TO QI (T < T00)	-PIHOM		PIHOM		
DEPOSITION GROWTH OF QC TO QI	-PIDW		PIDW		

Συνοψίζοντας, τα θετικά του σχήματος Goddard Cumulus Ensemble (GCE) είναι τα ακόλουθα:

- Πρόκειται για ένα σχετικά απλό και συγκρίσιμο με άλλα 3Ice Bulk σχήματα μικροφυσικής (Purdue-Lin, WSM6, Thompson).
- Το υπολογιστικό του κόστος είναι σχετικά μικρό.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Ενώ τα αρνητικά αυτού του σχήματος είναι τα εξής:

 Το γεγονός ότι είναι ένα single moment σχήμα, σημαίνει ότι δεν μπορεί να περιγράψει τη συγκέντρωση του αριθμού των υδρομετεώρων συναρτήσει του χρόνου, άρα οι παράμετροι N_{ox} και λ_x (παράμετρος κλίσης) δεν υπολογίζονται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

2.9 ANAAYTIKH ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ TOY WRF DOUBLE-MOMENT 6-CLASS (WDM6)

Το WRF Double-Moment-6 σχήμα της μικροφυσικής των νεφών ανήκει στην κατηγορία των double-moment σχημάτων και βασίζεται στις παραμετροποιήσεις του WSM6 όπως αναφέρεται από τους Lim and Hong (2010). Πρόκειται για ένα σχήμα μικροφυσικής το οποίο διαχειρίζεται τα θερμά νέφη ως double-moment σχήμα, ενώ όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.15 από τους Hong et al., (2004) και Hong and Lim (2006), τα ψυχρά νέφη τα διαχειρίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως και στην έκδοση του WSM6 σχήματος.

Παρόλο που για τα ψυχρά νέφη (ice phase) το WDM6 ακολουθεί τους ίδιους μηχανισμούς παραγωγής των κατακρημνισμάτων με το WSM6, οι ίδιες παραμετροποιήσεις θα ενεργούν διαφορετικά στα δύο σχήματα, καθώς στο WDM6 σχήμα προστίθενται και οι προγνωστικές εξισώσεις του αριθμού συγκέντρωσης (number concentration) των νεφοσταγόνων N_C και των βροχοσταγόνων N_R , οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά όλες τις διεργασίες που συμβαίνουν στα ψυχρά νέφη.

Για την ανάπτυξη του WDM6, εκτός από τις προγνωστικές εξισώσεις της αναλογίας μίγματος των υδρομετεώρων για κάθε κλάση, προστεθήκαν στο WSM6 σχήμα και οι προγνωστικές εξισώσεις για τον αριθμό συγκέντρωσης των





Σχήμα 2.15. Διάγραμμα ροής του σχήματος μικροφυσικής WDM6 για τα θερμά και ψυχρά νέφη (Hong et al., 2004, Hong and Lim 2006).

Επιπρόσθετα, στο διάγραμμα ροής που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.16 (α), ο όρος "Prevp_rc" ο οποίος τοποθετείται μέσα στον πράσινο κύκλο είναι υπεύθυνος για τη μετατροπή των νεφοσταγονιδίων σε βροχοσταγόνες, σύμφωνα με τους Khairoutdinov and Kogan (2000). Ο όρος "Pcact" ευθύνεται για τη διαδικασία της ενεργοποίησης των CCN (CCN activation process). Ενώ, οι διεργασίες-παραμετροποιήσεις που παρουσιάζονται με το κόκκινο (μπλε) χρώμα (Σχήμα 2.16 α και β), συμβαίνουν όταν η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη (μικρότερη) του μηδενός. Οι εξισώσεις της κάθε διαδικασίας αναφέρονται αναλυτικά στις εργασίες των Lim and Hong (2010).



(β)

Σχήμα 2.16. Διάγραμμα ροής των μικροφυσικών διεργασιών στο WDM6 για τις προγνωστικές εξισώσεις α) της αναλογίας μίγματος των κλάσεων και β) του αριθμού συγκέντρωσης των υδρομετεώρων (από Lim and Hong, 2010). Στο σχήμα WDM6, η προγνωστική εξίσωση κατανομής μεγέθους για νεφοσταγόνες και βροχοσταγόνες, διαμέτρου D, δίνεται από τη σχέση:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

$$n_{\chi}(D_{\chi}) = N_{\chi} \frac{\alpha_{\chi}}{\Gamma(\nu_{\chi})} \lambda_{\chi}^{\alpha_{\chi}\nu_{\chi}} D_{\chi}^{\alpha_{\chi}\nu_{\chi}-1} \exp\left[-(\lambda_{\chi}D_{\chi})^{\alpha_{\chi}}\right], \quad (1.33)$$

όπου χ [C, R], λ_{χ} η παράμετρος κλίσης και v_{χ} και a_{χ} είναι παράμετροι διασποράς (dispersion parameters). Επίσης, όλες οι μικροφυσικές διεργασίες στο WDM6 υπολογίζονται από την εξίσωση (1.33). Η παράμετρος κλίσης δίνεται από τη σχέση (1.34).

$$\lambda_{\chi} = \left[\frac{\pi}{6} \rho_{w} \frac{\Gamma(\nu_{\chi} + 3/\alpha_{\chi})}{\Gamma(\nu_{\chi})} \frac{N_{\chi}}{\rho_{\alpha}q_{\chi}}\right]^{\frac{1}{3}}, \qquad (1.34)$$

Η αντίστοιχη σχέση για τις βροχοσταγόνες στο WSM6 σχήμα, η όποια ακολουθεί την εκθετική κατανομή είναι:

$$n_{\rm R}({\rm D}_{\rm R}) = {\rm N}_{0\rm R} {\rm exp}\left(-\lambda_{\rm R} {\rm D}_{\rm R}\right), \qquad (1.35)$$

Η τελική ταχύτητα των βροχοσταγόνων διαμέτρου D_R, σύμφωνα με τους Locatelli and Hobbs (1974), δίνεται από τις ακόλουθες σχέσεις :

$$\vec{V}_{NR} = \frac{\int V_R(D_R) dN_{DR}}{\int dN_{DR}} = \frac{a_R}{\lambda_R^{b_R}} \Gamma(2 + b_R) \left(\frac{\rho_0}{\rho_\alpha}\right)^{1/2} , \qquad (1.36)$$
$$V_R(D_R) = a_R D_R^{b_R} \left(\frac{\rho_0}{\rho_\alpha}\right)^{1/2} , \qquad (1.37)$$

Τέλος, η εξίσωση της συγκέντρωσης των CCN που ενεργοποιούνται (number of activated CCN) είναι η εξής:

$$n_{\alpha} = (n + N_{C}) \left(\frac{s_{w}}{s_{max}}\right)^{k}, \qquad (1.38)$$

όπου k είναι μια παράμετρος με τιμές που κυμαίνονται από 0.3 μέχρι 1.0 (Khairoutdinov and Kogan 2000). Ο υπερκορεσμός (environmental supersaturation value) δίνεται από την παράμετρο S_W . Ως S_{max} ορίζεται ο υπερκορεσμός που απαιτείται, ώστε να ενεργοποιηθεί ο συνολικός αριθμός των σωματιδίων (n+N_c), n

είναι η ολική συγκέντρωση των CCN (total CCN number concentration) και τέλος N_C ο αριθμός συγκέντρωσης των νεφοσταγόνων .

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το σχήμα μικροφυσικής WDM6 είναι ιδανικό για μελέτες που αναφέρονται στην επίδραση των CCN στα νέφη, όπου είναι απαραίτητη η χρήση των προγνωστικών εξισώσεων της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων CCN και των νεφοσταγονιδίων. Επίσης, η διαχείριση των κατανομών μεγέθους των διάφορων υδρομετεώρων είναι αρκετά καλύτερη στο WDM6 απ' ότι στο WSM6 σχήμα.

Τέλος, το WDM6 διαχειρίζεται τις διεργασίες της αυτό-μετατροπής (autoconversion) και επισώρευσης (accretion) που λαμβάνουν χώρα στα θερμά νέφη, βασιζόμενο στις παραμετροποιήσεις των Cohard and Pinty (2000), όπου για το σχηματισμό της βροχής, απαιτείται η αυτό-μετατροπή (autoconversion) των νεφοσταγόνων σε βροχή. Η έναρξη της βροχής γίνεται μέσω της σύγκρουσης των νεφοσταγόνων, της συνένωσης (coalescence) των μικρών σταγονιδίων της βροχής, του χιονιού (αν T≥0) ή των graupel με τις νεφοσταγόνες που παρασύρουν κατά τη πτώση τους (accretion) και/ή της ανάπτυξής τους μέσω της διάχυσης. Οι υπόλοιπες μικροφυσικές διεργασίες που συμβαίνουν στα θερμά νέφη βασίζονται στις παραμετροποιήσεις των Hong and Lim (2006) (όμοιες με το WSM6 σχήμα).

2.10 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΜΙΚΡΟΦΥΣΙΚΗΣ WSM6, WDM6 KAI GODDARD – ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού WRF-ARW, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει, μέσα από ένα πλήθος σχημάτων παραμετροποιήσεων των μικροφυσικών διεργασιών (από απλουστευμένα μέχρι και πολύπλοκα σχήματα μικροφυσικής), ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες. Οι παραμετροποιήσεις των φυσικών διεργασιών που διέπουν τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες στη διαμόρφωση της αριθμητικής πρόγνωσης του καιρού, επομένως η επιλογή του καταλληλότερου και πιο αντιπροσωπευτικού σχήματος είναι πολύ σημαντική.

Τα περισσότερα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού χρησιμοποιούν προσεγγιστικά σχήματα μικροφυσικής (Bulk Microphysical Parameterization - BMP), στα οποία η κατανομή των υδρομετεώρων εκφράζεται από μια συνάρτηση κατανομής, που περιέχει δύο ή τρείς κατηγορίες πάγου. Σε αυτή την παράγραφο γίνεται μια προσπάθεια σύγκρισης τριών σχημάτων μικροφυσικής που εφαρμόζονται στο WRF, τα δυο εκ των οποίων είναι single-moment (WSM6, Goddard) και το τρίτο είναι double – moment (WDM6), ως προς διάφορες φυσικές παραμέτρους. Οι συγκρίσεις αφορούν στα σχήματα WDM6 και Goddard ως προς το WSM6 σχήμα μικροφυσικής, σε σχέση με τη βροχόπτωση, την ανακλαστικότητα και την αναλογία μίγματος των υδρομετεώρων. Πιο αναλυτικά τα σχήματα αυτά είναι τα εξής:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το σχήμα μικροφυσικής WSM6 (Hong and Lim, 2006) που βασίζεται στις παραμετροποιήσεις του PLin και περιέχει εξίσου τρεις κατηγορίες πάγου (3Ice - q_i, q_s, q_g). Οι όροι που σχετίζονται με τα graupel προέρχονται από αναφορές των Lin et al. (1983) και των Rutledge and Hobbs (1984).

Το σχήμα WDM6 που βασίζεται στις παραμετροποιήσεις του WSM6 σύμφωνα με τους Lim and Hong, (2010). Το οποίο διαχειρίζεται τα θερμά νέφη (warm rain) ως double – moment σχήμα, ενώ για τα ψυχρά νέφη (ice phase) ακολουθεί την ίδια διαδικασία με το WSM6. Επιπλέον, περιέχει προγνωστικές εξισώσεις του αριθμού συγκέντρωσης των νεφοσταγόνων (cloud), των βροχοσταγόνων (rain water), καθώς επίσης και των αιωρούμενων σωματιδίων CCN.

Τέλος, το σχήμα μικροφυσικής Goddard των Tao and Simpson, (1993), Tao et al. (2003b), το οποίο επίσης βασίζεται στις παραμετροποιήσεις των Lin et al., (1983); Rutledge and Hobbs (1984). Η διαφορά του σε σχέση με τα δύο προαναφερθέντα (3Ice) σχήματα, έγκειται στο γεγονός ότι σε αυτό το σχήμα υπάρχει επιπρόσθετα, η δυνατότητα επιλογής μεταξύ των graupel ή του χαλαζιού, ως 3^η κατηγορία πάγου (McCumber et al., 1991). Συγκεκριμένα, επιτρέπεται η επιλογή ενός σχήματος μόνο με παγοκρυστάλλους, χιόνι και graupel (3ICE-graupel) και ενός σχήματος μόνο με παγοκρυστάλλους, χιόνι και χαλάζι (3ICE-hail). Μια τρίτη επιλογή αποτελεί το σχήμα (2ICE) και περιέχει μόνο παγοκρυστάλλους και χιόνι.

2.10.1. Διαφορές των WSM6 - WDM6 σχημάτων ως προς τη βροχόπτωση

Διάφορες έρευνες που πραγματοποιήθηκαν, (Shi et al., 2010; Lim and Hong, 2010; Wu D. et al., 2013; Song, H. J., & Sohn, B. J. 2018) έδειξαν ότι η επιλογή του σχήματος WDM6 οδηγεί σε πολύ συχνή ενεργοποίηση των ανοδικών κινήσεων και υπερεκτίμηση των τοπικών μεγίστων της έντονης βροχόπτωσης στις προσομοιώσεις. Σύμφωνα με τους Wu D. et al., (2013), το σχήμα μικροφυσικής WDM6 έχει την τάση να εμφανίζει μεγαλύτερο ημερήσιο ύψος της αθροιστικής βροχόπτωσης, κυρίως πάνω

σε χερσαίες περιοχές. Η προσθήκη των προγνωστικών εξισώσεων του αριθμού συγκέντρωσης των πυρήνων συμπύκνωσης CCN στο σχήμα WDM6, ευνοεί τη δημιουργία νεφοσταγονιδίων (με συμπύκνωση των υδρατμών πάνω σε αυτούς), επομένως, υπάρχει άμεση επίδραση στην αθροιστική βροχόπτωση (Hong and Lim 2010).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το WDM6 σε σχέση με το WSM6, όπως αναφέρουν οι Shi et al. (2010), έχει την τάση να υποεκτιμά την ασθενή βροχόπτωση μέσα στην περιοχή σχηματισμού του άκμονα των καταιγιδοφόρων νεφών, εξαιτίας της έντονης εξάτμισης των βροχοσταγόνων που λαμβάνει χώρα. Λόγο εξάτμισης των βροχοσταγόνων εμφανίζει επίσης και μικρότερες τιμές επιφανειακής βροχόπτωσης από το WSM6. Επιπρόσθετα, σύμφωνα με τον Kain et al., (2008), στο WDM6 οι διαδικασίες της ανωμεταφοράς, που λαμβάνουν χώρα στον πυρήνα της καταιγίδας, είναι πολύ ασθενείς.

2.10.2. Διαφορές των WSM6 - WDM6 σχημάτων ως προς την ανακλαστικότητα

Τα δυο σχήματα της μικροφυσικής των νεφών WSM6 και WDM6, έπειτα από διάφορες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν (Kain et al., 2008; Lim and Hong, 2010; Wu D. et al., 2013; Song, H. J., & Sohn, B. J. 2018) δείχνουν να εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά, όσον αφορά στην ανακλαστικότητα, με κάποιες μικρές διάφορες. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι το WDM6 διαχειρίζεται με διαφορετικό τρόπο τις διεργασίες της αυτό-μετατροπής (autoconversion) και συσσωμάτωσης (accretion) που λαμβάνουν χώρα στα θερμά νέφη σε σχέση με το WSM6, ενώ οι υπόλοιπες μικροφυσικές διεργασίες είναι οι ίδιες με αυτές του WSM6 σχήματος. Παρόλο που για τα ψυχρά νέφη (ice phase) το WDM6 ακολουθεί τους ίδιους μηχανισμούς παραγωγής των κατακρημνισμάτων με το WSM6, οι ίδιες παραμετροποιήσεις θα ενεργούν διαφορετικά στα δύο σχήματα, καθώς στο WDM6 σχήμα προστίθενται και οι προγνωστικές εξισώσεις του αριθμού συγκέντρωσης (number concentration) των νεφοσταγόνων N_C και των βροχοσταγόνων N_R, οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά όλες τις διεργασίες παγοποίησης, που συμβαίνουν στα ψυχρά νέφη (Lim and Hong, 2010).

Επομένως, τα αποτελέσματα των δυο σχημάτων είναι σε καλή συμφωνία μεταξύ τους, με το WDM6 να εμφανίζει πιο έντονη ανακλαστικότητα πάνω από το επίπεδο τήξης (bellow melting layer) και ελαφρώς μικρότερη ανακλαστικότητα στα κατώτερα επιφανειακά στρώματα σε σχέση με το WSM6. Οι υπερεκτιμημένες τιμές της

ανακλαστικότητας σύμφωνα με τους Lim and Hong (2010) και Song, H. J. and Sohn, B. J., (2018) οφείλονται στο μεγάλο αριθμό συγκέντρωσης σωματιδίων graupel που εμφανίζουν οι προσομοιώσεις με το WDM6 σχήμα (θα αναλυθεί στην επόμενη παράγραφο).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

2.10.3. Διαφορές των WSM6 - WDM6 σχημάτων ως προς την αναλογία μίγματος υδρομετεώρων (mixing ratio)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι φυσικοί μηχανισμοί που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα, όπως είναι τα νέφη και ο υετός, είτε αναπαριστάνονται στα σημεία πλέγματος, είτε λαμβάνονται υπόψη μέσω παραμετροποιήσεων, εάν δεν μπορούν να αναλυθούν από το μοντέλο λόγο ανεπαρκούς χωρικής ανάλυσης. Στο αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού WRF η υγρασία συνήθως εκφράζεται ως αναλογία μίγματος (kg νερού ανά kg ξηρού αέρα), για τα διάφορα υδρομετέωρα (QVAPOR για τους υδρατμούς, QCLOUD για το νερό των νεφών, QRAIN για το νερό της βροχής, καθώς και πρόσθετες μεταβλητές για τον πάγο, το χαλάζι, graupel).

Τα αποτελέσματα διάφορων ερευνών που πραγματοποιήθηκαν, όσον αφορά στην κατακόρυφη κατανομή των υδρομετεώρων (Lim and Hong, 2010; Wu D. et al., 2013; Song, H. J., & Sohn, B. J. 2018), έδειξαν ότι και τα δυο σχήματα μικροφυσικής WSM6 και WDM6, εμφανίζουν παρόμοιο προφίλ, όσον αφορά στις διεργασίες που συμβαίνουν στα ψυχρά νέφη (ice phase), καθώς για τα ψυχρά νέφη ακολουθούν τους ίδιους μηγανισμούς παράγωγης κατακρημνισμάτων (Hong et al., 2004 και Hong and Lim, 2006). Επομένως δύναται να παράγουν σχεδόν ίδιες ποσότητες στερεών υδρομετεώρων (solid hydrometeor) όπως είναι τα graupel, με το WDM6 να εμφανίζει ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές αναλογίας μίγματος για τα graupel. Αντίθετα, η κατακόρυφη κατανομή βρογοσταγόνων QRAIN προσομοιώνεται των ακολουθώντας τις διαδικασίες της μικροφυσικής που λαμβάνουν χώρα στα θερμά νέφη (warm rain process), με αποτέλεσμα οι διαφορές σε αυτή την περίπτωση να είναι πιο ευδιάκριτες. Στο WDM6 υπερεκτιμάται η αναλογία μίγματος των βροχοσταγόνων (QRAIN) και εμφανίζονται μεγαλύτερα ποσά από ότι στο WSM6 σχήμα κάτω από το επίπεδο της τήξης των υδρομετεώρων (below the melting layer <5km), ενώ από την άλλη μεριά φαίνεται να εμφανίζει μικρότερες τιμές για το νερό των νεφών (QCLOUD). Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της έντονης αύξησης του μεγέθους των νεφοσταγόνων λόγο της σύγκρουσής και της συνένωσής τους (collisioncoalescence) με τα μικρά νεφοσταγονίδια της βροχής, που παρασύρουν κατά την πτώση τους (Song, H. J. and Sohn, B. J. 2018).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Έπειτα από όλα όσα έχουν αναφερθεί, από τις συγκρίσεις των προσομοιώσεων των δυο σχημάτων που έχουν γίνει σε πολλές έρευνες, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η προσθήκη των προγνωστικών εξισώσεων του αριθμού συγκέντρωσης (number concentration) των νεφοσταγόνων N_C, των βροχοσταγόνων N_R και των αιωρούμενων σωματιδίων N_{CCN} επηρεάζουν σημαντικά όλες τις διεργασίες που συμβαίνουν στα ψυχρά νέφη. Σύμφωνα με τους Lim and Hong, (2010), μια πιθανή μείωση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων N_{CCN} επηρεάζουν N_C και αύξηση της συγκέντρωσης των νεφοσταγόνων N_C και αύξηση των βροχοσταγόνων N_R. Οι μεγάλες τιμές του αριθμού συγκέντρωσης των βροχοσταγόνων N_R έχουν ως αποτέλεσμα αυτές να εμφανίζουν μικρές τερματικές ταχύτητες και η μάζα τους να αυξάνεται έντονα κάτω από το επίπεδο παγοποίησης, έχοντας ως άμεση συνέπεια, την εμφάνιση έντονης ανακλαστικότητας πάνω από το επίπεδο τήξης (melting layer 3-5km) και τη μειωμένη επιφανειακή βροχόπτωση (λόγο της έντονης εξάτμισης).

2.10.4. Διαφορές των WSM6 - Goddard σχημάτων ως προς τη βροχόπτωση

Οι Tao et al., (2009), πραγματοποίησαν υψηλής ανάλυσης προσομοιώσεις σε ένα μέσης κλίμακας σύστημα ανωμεταφοράς, χρησιμοποιώντας το αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού WRF. Σύμφωνα με τα αποτελέσματά τους, ύστερα από τη σύγκριση των σχημάτων Goddard (3ICE-graupel) και του WSM6, διέκριναν ότι το WSM6 ταυτίζεται περισσότερο με τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων της βιβλιογραφίας, όσον αφορά στην ένταση της βροχόπτωσης. Το WSM6 υποεκτιμά την ασθενή βροχόπτωση, ενώ υπερεκτιμά την έντονη βροχή και προσομοιώνει καλύτερα τα ισχυρά τοπικά μέγιστα της βροχής. Εμφανίζει στενότερη και πιο έντονη γραμμή ανωμεταφοράς απ' ότι εμφανίζουν οι προσομοιώσεις με το Goddard. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα graupel στην περίπτωση του WSM6 σχήματος εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές πυκνότητας και άρα μεγαλύτερες τερματικές ταχύτητες από ότι τα graupel που προσομοιώνει το σχήμα Goddard (Πίνακας 3).

Επιπρόσθετα και οι Molthan et al., (2008) στα αποτελέσματά τους αναφέρουν ότι τα graupel στο σχήμα WSM6 εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές πυκνότητας για την ίδια τιμή μεγίστου αριθμού σωματιδίων ανά όγκο (ίδια σε αριθμό αλλά μεγαλύτερα σε μέγεθος), (Πίνακας 3). Οι διαφορές αυτές μπορεί να επηρεάσουν όχι μόνο τη συγκέντρωση των υδρομετεώρων, αλλά και τις μικροφυσικές και δυναμικές διεργασίες. Τέλος, το ισοζύγιο του νερού είναι σε ισορροπία στους υπολογισμούς.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Πίνακας 3. Τιμές της πυκνότητας (σε kg m⁻³) των υδρομετεώρων και ο μέγιστος αριθμός σωματιδίων ανά όγκο n_{ox} (σε m⁻⁴) των σχημάτων WSM και Goddard, (από Molthan et al., 2008).

Scheme	Category	$n_{ox} (m^{-4})$	$\rho_x (\mathrm{kg} m^{-3})$
GSFC	Rain	$8.0x10^{6}$	1000
	Snow	$1.6x10^{7}$	100
	Graupel	$4.0x10^{6}$	400
	Hail	$2.0x10^5$	917
WSM	Rain	$8.0x10^{6}$	1000
	Snow	$2.0x10^6 e^{0.12(T_o-T)}$	100
	Graupel	$4.0x10^{6}$	500

Οι Forell and Ogura, (1988) στη μελέτη τους, έδειξαν ότι το Goddard (3ICEgraupel) υπερεκτιμά την επιφανειακή βροχόπτωση (more surface rain). Σε παρόμοια αποτελέσματα κατέληξαν και οι McCumber et al., (1991); Wu D. et al., (2013); Song, H. J. & Sohn, B. J., 2018).

2.10.5. Διαφορές των WSM6 - Goddard σχημάτων ως προς την ανακλαστικότητα

Το Goddard εμφανίζει παρόμοιο μοτίβο με το WSM6 σχήμα, και σύμφωνα με τους Song, H. J. and Sohn, B. J., (2018) προσομοιώνει αρκετά καλύτερα την ανακλαστικότητα σε σχέση με αυτό, εμφανίζοντας ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές κατά τη διάρκεια επεισοδίου έντονης βροχόπτωσης. Οι υπερεκτιμημένες τιμές της ανακλαστικότητας οφείλονται επίσης στο μεγάλο αριθμό συγκέντρωσης σωματιδίων graupel που εμφανίζουν οι προσομοιώσεις με το σχήμα Goddard, στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας.

Επιπρόσθετα οι Wu D. et al., (2013) αναφέρουν ότι το Goddard εμφανίζει ελάχιστα πιο έντονη ανακλαστικότητα πάνω από την περιοχή σχηματισμού των κυττάρων της καταιγίδας, καθώς οι μικροφυσικές διεργασίες που ευθύνονται για τη δημιουργία και για το μετασχηματισμό των παγοσωματιδίων (τύπου graupel) στα

νέφη όπου λαμβάνουν χώρα οι διεργασίες μικτής φάσης (mixed-phase), ενεργοποιούν πιο εύκολα τις ανοδικές κινήσεις από το σχήμα WSM6.

2.10.6. Διαφορές των WSM6 - Goddard σχημάτων ως προς την αναλογία μίγματος υδρομετεώρων (mixing ratio)

Τα αποτελέσματα διάφορων ερευνών που πραγματοποιήθηκαν όσον αφορά στην κατακόρυφη κατανομή των υδρομετεώρων (QCLOUD, QRAIN και graupel), (Tao et al. 2009, Wu D. et al., 2013; Song, H. J. & Sohn, B. J. 2018) έδειξαν ότι τα δυο σχήματα μικροφυσικής, WSM6 και Goddard, εμφανίζουν κάποιες μικρές διαφορές στο προφίλ τους. Το Goddard παράγει μεγαλύτερες ποσότητες στερεών υδρομετεώρων (solid hydrometeor) όπως είναι τα graupel, σε σχέση με το σχήμα WSM6. Ενώ από την άλλη μεριά, στο WSM6 εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές αναλογίας μίγματος, τόσο των βροχοσταγόνων (QRAIN), όσο και για το νερό των νεφών (QCLOUD). Σε παρόμοια αποτελέσματα κατέληξαν και οι Kim et al., (2013). Παρόλο που τα σχήματα της μικροφυσικής Goddard και WSM6 βασίζονται στις παραμετροποιήσεις των Lin et al., (1983) και Rutledge and Hobbs, (1984), εμφανίζουν αξιόλογες διαφορές. Αυτό συμβαίνει γιατί το σχήμα Goddard τροποποιήθηκε από τους Tao et al., (2003) και Lang et al., (2007), με σκοπό τη μείωση των υπερεκτιμημένων (overestimated) συγκεντρώσεων των graupel, μέσα στην περιοχή σχηματισμού του άκμονα των καταιγιδοφόρων νεφών, ενώ ταυτόχρονα έχει επιτευχθεί και καλύτερη διαχείριση, όσον αφορά στις συνθήκες κορεσμού. Οι τεχνικές αυτές παρέχονται στο μοντέλο, για να εξασφαλίσουν ότι ο υπερκορεσμός (υποκορεσμός) δε μπορεί να υπάρξει σε ένα σημείο του πλέγματος (grid point) που είναι χωρίς νέφωση (με νέφωση).

2.10.7. Επιμέρους συμπεράσματα

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Έγινε μια προσπάθεια παρουσίασης όλων των διαθέσιμων προσεγγιστικών σχημάτων μικροφυσικής, και δόθηκε έμφαση στη σύγκριση των τριών βέλτιστων σχημάτων μικροφυσικής, που εφαρμόζονται στο WRF, στα οποία η κατανομή των υδρομετεώρων εκφράζεται από μια συνάρτηση κατανομής, που περιέχει τρείς κατηγορίες πάγου (3Ice - q_i, q_s, q_g). Και τα τρία αυτά σχήματα χρησιμοποιούνται, τόσο σε επιχειρησιακές προγνώσεις, όσο και στην έρευνα.

Η επιλογή του καταλληλότερου και πιο αντιπροσωπευτικού σχήματος είναι πολύ σημαντική και χρήζει ιδιαίτερης προσοχής. Στο αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού WRF-ARW, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει, μέσα από ένα πλήθος σχημάτων παραμετροποιήσεων των μικροφυσικών διεργασιών (από απλουστευμένα μέχρι και πολύπλοκα σχήματα μικροφυσικής), ανάλογα με τις εκάστοτε ερευνητικές ανάγκες.

Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκαν, ύστερα από συγκριτική παρουσίαση, τρία σχήματα μικροφυσικής, τα δυο εκ των οποίων είναι single-moment (WSM6, Goddard) και το τρίτο είναι double – moment (WDM6), όπου και στις τρεις περιπτώσεις, οι όροι που σχετίζονται με τα graupel βασίζονται στις παραμετροποιήσεις των Lin et al., (1983) και Rutledge and Hobbs (1984). Παρά το γεγονός ότι τα εν λόγω σχήματα βασίζονται στις ίδιες παραμετροποιήσεις, δεν εμφανίζουν μόνο ομοιότητες, αλλά και διαφορές. Το σχήμα Goddard έχει τροποποιηθεί, σε σχέση με το WSM6, από τους Tao et al., (2003) και Lang et al. (2007), έχοντας ως στόχο τη μείωση των υπερεκτιμημένων (overestimated) συγκεντρώσεων των graupel μέσα στην περιοχή σχηματισμού του άκμονα των καταιγιδοφόρων νεφών, ενώ ταυτόχρονα πρόσθεσαν και νέες τεχνικές για την καλύτερη διαχείριση των συνθηκών κορεσμού. Το σχήμα WDM6 διαχειρίζεται τα θερμά νέφη ως double-moment σχήμα (Hong et al., 2004 και Hong and Lim 2006), ενώ τα ψυχρά νέφη τα διαχειρίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως και στην έκδοση του WSM6 σχήματος.

Από τη βιβλιογραφική σύγκριση των τριών σχημάτων, WSM6, WDM6 και Goddard, σε σχέση με α) τη βροχόπτωση, β) την ανακλαστικότητα και γ) την αναλογία μίγματος των υδρομετεώρων, προκύπτουν τα παρακάτω συνοπτικά παρουσιαζόμενα αποτελέσματα:

Α) ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το σχήμα WSM6 ταυτίζεται περισσότερο με τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων της βιβλιογραφίας, όσον αφορά στην ένταση της βροχόπτωσης σε σχέση με τα άλλα δυο σχήματα μικροφυσικής (Goddard και WDM6) και προσομοιώνει πολύ καλά τα ισχυρά τοπικά μέγιστα της βροχής.

To σχήμα Goddard:

- υπερεκτιμά την ασθενή βροχόπτωση,
- υποεκτιμά την έντονη βροχή

δεν προσομοιώνει πολύ καλά τα ισχυρά τοπικά μέγιστα της βροχής.

Το σχήμα WDM6:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- υποεκτιμά την ασθενή βροχόπτωση μέσα στην περιοχή σχηματισμού του άκμονα των καταιγιδοφόρων νεφών, εξαιτίας της έντονης εξάτμισης των βροχοσταγόνων που λαμβάνει χώρα. Λόγο της εξάτμισης των βροχοσταγόνων, εμφανίζει και μικρότερες τιμές επιφανειακής βροχόπτωσης από το WSM6.
- ✓ οδηγεί σε πολύ συχνή ενεργοποίηση των ανοδικών κινήσεων και υπερεκτίμηση των τοπικών μεγίστων της έντονης βροχόπτωσης στις προσομοιώσεις.
- εμφανίζει μεγαλύτερο ημερήσιο ύψος της αθροιστικής βροχόπτωσης, κυρίως
 πάνω σε χερσαίες περιοχές.

Β) ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

Και τα τρία σχήματα, WSM6, WDM6 και Goddard, εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά και προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων της βιβλιογραφίας, όσον αφορά στην ανακλαστικότητα, έπειτα από διάφορες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν (Kain et al., 2008; Lim and Hong, 2010; Wu D. et al., 2013; Song, H. J., & Sohn, B. J. 2018). Το Goddard όμως προσομοιώνει αρκετά καλύτερα την ανακλαστικότητα σε σχέση με τα άλλα δύο προαναφερθέντα σχήματα, σύμφωνα με τους Song, H. J. and Sohn, B. J., (2018).

Το σχήμα WDM6:

- εμφανίζει πιο έντονη ανακλαστικότητα πάνω από το επίπεδο τήξης (bellow melting layer) και
- ✓ ελαφρώς μικρότερη ανακλαστικότητα στα κατώτερα επιφανειακά στρώματα, σύμφωνα με τους Lim and Hong (2010) και Song, H. J. and Sohn, B. J., (2018).

Το σχήμα WSM6:

- ✓ εμφανίζει μικρότερες τιμές ανακλαστικότητας κάτω από το επίπεδο τήξης (bellow melting layer) και
- ✓ μεγαλύτερη ανακλαστικότητα στα κατώτερα επιφανειακά στρώματα, (Lim and Hong 2010 και Song, H. J. and Sohn, B. J., 2018).

Το σχήμα Goddard:

εμφανίζει ελάχιστα πιο έντονη ανακλαστικότητα πάνω από την περιοχή σχηματισμού των κυττάρων της καταιγίδας (Wu D. et al., 2013).

Γ) ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΜΙΓΜΑΤΟΣ ΥΔΡΟΜΕΤΕΩΡΩΝ (ΜΙΧΙΝG RATIO)

Τα τρία σχήματα μικροφυσικής, WSM6, WDM6 και Goddard, εμφανίζουν κάποιες μικρές διαφορές στο προφίλ τους, όσον αφορά στην ποσότητα των στερεών υδρομετεώρων (solid hydrometeor) που παράγουν, με το WSM6 να ταυτίζεται περισσότερο με τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων της βιβλιογραφίας σε σχέση με τα άλλα δυο σχήματα (WDM6 και Goddard), (Tao et al. 2009, Wu D. et al., 2013; Song, H. J. & Sohn, B. J. 2018).

Το σχήμα WSM6:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

> ✓ εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές αναλογίας μίγματος για το διαθέσιμο νερό των νεφών (QCLOUD).

To σχήμα Goddard:

- υπερεκτίμα την ποσότητα των στερεών υδρομετεώρων (solid hydrometeor)
 όπως είναι τα graupel και
- ✓ υποεκτιμά την αναλογία μίγματος του νερού των νεφών (QCLOUD).
- Το σχήμα WDM6:
- εμφανίζει ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές αναλογίας μίγματος για τα graupel και
- ✓ υποεκτιμά την αναλογία μίγματος του διαθέσιμου νερού των νεφών (QCLOUD).

Συμπερασματικά, σύμφωνα με όσα έχουν προαναφερθεί, το σχήμα WSM6 μπορεί να είναι απλούστερο σε σχέση με το WDM6 και το Goddard, όμως, προσομοιώνει καλύτερα τη βροχόπτωση στα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης, τα ισχυρά τοπικά μέγιστα της βροχής και την αναλογία μίγματος των υδρομετεώρων, ενώ το Goddard δύναται να προσομοιώνει καλύτερα και την ανακλαστικότητα, σε σχέση με τα άλλα δυο προαναφερθέντα σχήματα.

Σε επόμενο κεφάλαιο ακολουθούν οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με το μοντέλο πρόγνωσης καιρού Weather Research and Forecasting (WRF-ARW έκδοση 3.5.1) με τα τρία αυτά σχήματα μικροφυσικής των νεφών. Αρχικά με το WSM6 – WRF Single moment 6-Class microphysics scheme που θεωρείται ως προσομοίωση αναφοράς (control experiment), ενώ για τις προσομοιώσεις ευαισθησίας (sensitivity experiments) χρησιμοποιήθηκαν τα δυο άλλα σχήματα μικροφυσικής, το WDM6 – WRF Double moment 6-Class microphysics scheme και το Goddard Single moment 6-Class microphysics scheme.



3.1 ΣΥΝΟΠΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Η περιγραφή των συνοπτικών συνθηκών βασίζεται κυρίως στις αναλύσεις του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων – ECMWF, οι οποίες ήταν διαθέσιμες ανά 6 ώρες, με χωρική διακριτοποίηση 0,125° × 0,125°. Η περιοχή που επιλέχθηκε περιλαμβάνει ολόκληρη την Ευρώπη, τη Μεσόγειο και τις ακτές της Βόρειας Αφρικής με χωρική ανάλυση 15 km επί 15 km χρησιμοποιώντας πλέγμα Arakawa τύπου C (Πυθαρούλης, 2014). Επιπρόσθετα, στη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν παρατηρήσεις επιφάνειας από τη Βρετανική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Met. Office), ενώ έγινε και χρήση τεφιγραμμάτων ραδιοβολίσεων από το Πανεπιστήμιο της Πολιτείας του Wyoming των Η.Π.Α.

Ως ιδιαίτερη περιοχή μελέτης επιλέχθηκε αυτή της Κεντρικής Μακεδονίας, δίδοντας έμφαση στις περιοχές των νομών Ημαθίας και Πέλλας, εξαιτίας των ιδιόμορφων φυσιογραφικών χαρακτηριστικών και του πολύπλοκου αναγλύφου της, μιας και αποτελείται από βουνά και κορυφογραμμές ύψους έως και 2km με αρκετά ενδιαφέρουσες λεκάνες απορροής. Είναι κυρίως μια πεδινή έκταση, με δυναμικές καλλιέργειες, σημαντικές για την τοπική αλλά και εθνική οικονομία. Η «συχνή» εκδήλωση έντονων καταιγίδων στην περιοχή έχει άμεσες αρνητικές επιπτώσεις στην αγροτική παραγωγή, γι' αυτό και η έγκαιρη πρόγνωσή τους είναι κεφαλαιώδους σημασίας, αφού είναι καθοριστική για την καταστολή τους (Καρακώστας, 2000). Η περιοχή αυτή αποτελεί μία από τις περιοχές εφαρμογής του Εθνικού Προγράμματος Χαλαζικής Προστασίας των Καλλιεργειών (Karacostas, 1984; Karacostas, 1989).

Σύμφωνα με τους Μπαλαφούτης και Μαχαίρας (1982), Karacostas (1984) και Σιούτας (1999), η μεγαλύτερη καταιγιδοφόρος δραστηριότητα εμφανίζεται πάνω από την περιοχή αργά μεσημέρι ή κατά τις πρώτες απογευματινές ώρες. Στη Βόρεια Ελλάδα τα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης που εμφανίζονται, είναι κυρίως ψυχρά νέφη, δηλαδή νέφη που οι κορυφές τους εκτείνονται πάνω από την ισόθερμη των 0° C. Οι βασικές προϋποθέσεις ανάπτυξής των καταιγίδων είναι οι εξής:

 η ύπαρξη σημαντικής υγρασίας στα χαμηλά και μέσα στρώματα της ατμόσφαιρας η ύπαρξη θερμοδυναμικής αστάθειας σε διάφορα, κατά περιπτώσεις, ατμοσφαιρικά επίπεδα και

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

η ύπαρξη ανυψωτικού μηχανισμού, μηχανικού ή/και θερμικού, για την ανάπτυξη και δημιουργία κυρίως καταιγιδοφόρων νεφών.

Ακόμα και αν η ατμόσφαιρα είναι ασταθής, απαιτείται μηχανισμός διέγερσης της ανοδικής μεταφοράς που οδηγεί στη δημιουργία καταιγίδων. Ένας από τους πιο συχνούς παράγοντες σχηματισμού κατακόρυφων νεφών, που έχει παρατηρηθεί στην περιοχή μελέτης, είναι η σύγκλιση αερίων μαζών με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Θερμές και υγρές αέριες μάζες μεταφέρονται από το Θερμαϊκό κόλπο στην πεδιάδα των νομών Ημαθίας – Πέλλας, μέσω της θαλάσσιας αύρας, και συναντούν τις ψυχρές και ξηρές αέριες μάζες που διολισθαίνουν από τους γύρω ορεινούς όγκους (Καρακώστας, 1992). Οι θερμές και υγρές αέριες μάζες αποτελούν ένδειξη της παροχής ενέργειας για την καταιγίδα, ενώ στην αντίπερα όχθη, οι ψύχρες και ξηρές αέριες μάζες συντελούν στην ένταση των ανοδικών ρευμάτων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ασταθούς περιβάλλοντος (Καρακώστας, 2005).

Στο πλαίσιο μελέτης της διατριβής αυτής εξετάσθηκαν διάφορες περιπτώσεις μελέτης (case studies), με διαφορετικές συνοπτικές καταστάσεις, για την εφαρμογή και αξιολόγηση των επιλεγμένων σχημάτων μικροφυσικής του μοντέλου. Πιο αναλυτικά, μελετήθηκαν οι ακόλουθες περιπτώσεις:

- 13/03/2016, 21/05/2016 και 06/09/2016, στις οποίες η συνοπτική κατάσταση που επικρατούσε στην ανώτερη ατμόσφαιρα (στα 500 hPa), στην περιοχή ενδιαφέροντος, είναι ένα κλειστό βαρομετρικό χαμηλό.
- 05/06/2016 στην οποία η συνοπτική κατάσταση που επικρατούσε στην ανώτερη ατμόσφαιρα (στα 500 hPa), στην περιοχή ενδιαφέροντος, είναι η ζωνική κυκλοφορία, (συνύπαρξη ενός χαμηλού πλάτους αυλώνα στα βόρεια και μιας χαμηλού πλάτους ράχης στα νότια της περιοχής ενδιαφέροντος).
- 09/11/2016 όπου η συνοπτική κατάσταση που επικρατούσε στην ανώτερη ατμόσφαιρα (στα 500 hPa), στην περιοχή ενδιαφέροντος, είναι η Νοτιοδυτική κυκλοφορία, (ύπαρξη ενός μεγάλου μήκους κυματισμού, όπου ο αυλώνας βρίσκεται δυτικά - νοτιοδυτικά και η ράχη ανατολικά και βορειοανατολικά της περιοχής ενδιαφέροντος).

Από τις παραπάνω περιπτώσεις που μελετήθηκαν, επιλέχθηκε για παρουσίαση αυτή της 21^{ης} Μαΐου 2016, ως πιο αντιπροσωπευτική και αναλύεται παρακάτω.

Η συνοπτική κατάσταση που επικρατούσε στις 21 Μαΐου 2016 στην ανώτερη ατμόσφαιρα (στα 500 hPa), στην περιοχή ενδιαφέροντος είναι ένα κλειστό βαρομετρικό χαμηλό (συνοπτική ανάλυση πραγματοποιείται στην επόμενη παράγραφο). Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτής είναι η παρουσία ενός αυλώνα και μιας τουλάχιστον κλειστής ισοϋψούς, στο μεγάλου μήκους κυματισμό, πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος. Πρόκειται για ένα καλά οργανωμένο βαρομετρικό σύστημα, με οργανωμένη βαροκλινική ζώνη και ένα αρκετά βαθύ και έντονο σύστημα χαμηλών πιέσεων στην επιφάνεια, δηλαδή μια συνοπτική κατάσταση L-2 σύμφωνα με τους Καρακώστας κ.α., (1992) και Karacostas et al., (2017).

3.1.1. Ανάλυση χαρτών στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στις 21 Μαΐου 2016, στις 00UTC με 06UTC, ένας βαρομετρικός αυλώνας μεγάλου μήκους κύματος που έχει εξελιχθεί σε κλειστό σύστημα γεωδυναμικών υψών, παρατηρείται νοτιοανατολικά της Ιταλίας με κατεύθυνση προς την Πελοπόννησο, ενώ μια ισχυρή βαρομετρική ράχη είναι εμφανής στα κεντροδυτικά της Ευρώπης, στο επίπεδο της ισοβαρικής επιφάνειας των 500 hPa, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Στις επόμενες 12 ώρες, δηλαδή στις 12UTC με 18UTC, αντίστοιχα, το κλειστό βαρομετρικό χαμηλό βρίσκεται στα κεντρικά και νότια του Ελλαδικού χώρου με γεωδυναμικό ύψος περίπου 5480 gpm (Σχήμα. 3.1).

Λόγω της θέσης του βαρομετρικού χαμηλού, θερμές και υγρές αέριες μάζες μεταφέρονται από νοτιότερες -κυρίως θαλάσσιες- περιοχές, διαμέσου του Θερμαϊκού Κόλπου προς την περιοχή ενδιαφέροντος της κεντρικής Μακεδονίας.





Σχήμα 3.1. Γεωδυναμικό ύψος (gpm) και θερμοκρασία (°C) στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa, ανά 6 ώρες την 21^η Μαΐου 2016. Ισοϋψείς ανά 40 γεωδυναμικά μέτρα.

3.1.2. Πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa)

Στις 00UTC την 21^η Μαΐου 2016 χαμηλές πιέσεις κυριάρχησαν στα νοτιοδυτικά της Ελλάδας. Η ελάχιστη πίεση παρατηρήθηκε στις 06 και 12UTC πάνω από τον Ελλαδικό χώρο στα 1005hPa (Σχήμα 3.2). Στο χάρτη επιφανείας στις 12UTC, εμφανίζεται συνεσφιγμένο μέτωπο νοτιοδυτικά της περιοχής ενδιαφέροντος. Η σύσφιξη των μετώπων γίνεται στη βορειοανατολική Πελοπόννησο. Συγκρίνοντας τους συνοπτικούς χάρτες επιφανείας πάνω από την ευρύτερη περιοχή της Ελλάδας και των αντίστοιχων χαρτών του γεωδυναμικού ύψους στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa (Σχήμα 3.1), παρατηρείται ότι το βαρομετρικό χαμηλό που πέρασε από την Ελλάδα έχει κλίση προς τα δυτικά καθ' ύψος. Σύμφωνα με τη θεωρία της βαροκλινικής αστάθειας, το σύστημα είναι σε φάση ανάπτυξης και ενίσχυσης, μετατρέποντας κινητική ενέργεια σε δυναμική, με αποτέλεσμα στην περιοχή να υπάρχουν έντονες ανοδικές κινήσεις αερίων μαζών και να ευνοείται η ανάπτυξη καταιγίδων (Καρακώστας, 2004). Αξιοσημείωτο όμως είναι και ο άξονας του αυλώνα που περνάει σχεδόν παράλληλα από τις ακτές της Μακεδονίας στις 12UTC με 18UTC, με αποτέλεσμα να επηρεάσει, σε μεγάλο βαθμό, τις καιρικές συνθήκες στην περιογή ενδιαφέροντος.



Σχήμα 3.2. Χάρτες πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa) ανά 6 ώρες την 21^η Μαΐου 2016, από τη Βρετανική Μετεωρολογική Υπηρεσία. (www.metoffice.gov.uk)

3.1.3. Ανάλυση χαρτών στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η ύπαρξη του κλειστού βαρομετρικού χαμηλού είναι εμφανής και στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa (Σχήμα 3.3), με τις χαμηλές τιμές του γεωδυναμικού ύψους, περίπου στα 1360gpm, πάνω από την Ελλάδα στις 06 με 12 UTC. Κατά τη διάρκεια της 21^{ης} Μαΐου 2016, παρατηρείται μεταφορά ψυχρών αεριών μαζών από τη νότια Ιταλία προς τη νοτιοδυτική Ελλάδα στις 00-06UTC (Σχήμα 3.3), με αποτέλεσμα τη μικρή πτώση της θερμοκρασίας στον Ελλαδικό χώρο.



Σχήμα 3.3. Γεωδυναμικό ύψος (gpm) και θερμοκρασία (°C) στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa, ανά 6 ώρες την 21^{η} Μαΐου 2016. Ισοϋψείς ανά 20 gpm.

3.1.4. Απεικόνιση του στροβιλισμού στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa Στις 00UTC της 21^{ης} Μαΐου 2016, η κατακόρυφη βαθμίδα του σχετικού στροβιλισμού είναι θετική, κυρίως στην περιοχή της δυτικής Ελλάδας, μπροστά (ανατολικά) από το βαρομετρικό χαμηλό των γεωδυναμικών υψών. Μετά τις 06UTC υπάρχει θετική μεταφορά του στροβιλισμού στην περιοχή της κεντρικής Μακεδονίας, ευνοώντας τα ανοδικά ρεύματα στην περιοχή ενδιαφέροντος. (Σχήμα 3.4)

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 3.4. Σχετικός στροβιλισμός στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa (x10⁻⁵ s⁻¹), ανά 6 ώρες την 21^η Μαΐου 2016. Ισοϋψείς ανά 40 γεωδυναμικά μέτρα.

3.1.5. Ανάλυση θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης στην επιφάνεια

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Την 21^η Μαΐου 2016, στις 06UTC, παρατηρείται στην επιφάνεια η ελάχιστη τιμή της πίεσης να είναι γύρω στα 1004 hPa. Η θερμοκρασία στην επιφάνεια στις 12UTC εμφανίζεται περίπου στους 10 με 12°C, η οποία είναι σχετικά μικρή για την εποχή. Εξαιτίας της επικράτησης του συστήματος, υπήρχε νεφοκάλυψη και έντονες βροχοπτώσεις στην περιοχή ενδιαφέροντος. (Σχήμα 3.5).



ECMWF Analysis

Σχήμα 3.5. Θερμοκρασία και πίεση στην επιφάνεια, ανά 6 ώρες την 21^η Μαΐου 2016. Ισοϋψείς ανά 4 γεωδυναμικά μέτρα.
3.1.6. Σχετική υγρασία στην ισοβαρική επιφάνεια των 700 hPa

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στο σχήμα 3.6 απεικονίζεται η σχετική υγρασία, εκφρασμένη σε ποσοστό επί τοις εκατό και τα γεωδυναμικά ύψη στην ισοβαρική επιφάνεια των 700 hPa. Παρατηρούνται υψηλά ποσά σχετικής υγρασίας στις περιοχές που βρίσκονται μπροστά από το κλειστό χαμηλό, δηλαδή στον άξονά του και ανατολικά από αυτόν, καθώς εκεί υπάρχει θετική μεταφορά στροβιλισμού, άρα και έντονα ανοδικά ρεύματα. Επομένως, τα γεωδυναμικά ύψη στα 700 hPa συνδέονται άμεσα με τα ποσοστά της υγρασίας. Στις 21 Μαΐου 2016 καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, η σχετική υγρασία στο 90%. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι δημιουργείται ένα ευνοϊκό περιβάλλον για ισχυρές βροχοπτώσεις στην περιοχή ενδιαφέροντος.



Σχήμα 3.6. Σχετική υγρασία (%) και γεωδυναμικά ύψη (gpm) στην ισοβαρική επιφάνεια των 700 hPa, ανά 6 ώρες την 21^{η} Μαΐου 2016. Ισοϋψείς ανά 40 γεωδυναμικά μέτρα.

3.1.7. Χάρτες διεύθυνσης και ταχύτητας του επιφανειακού ανέμου

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στο Σχήμα 3.7 απεικονίζονται η ταχύτητα και η διεύθυνση του επιφανειακού ανέμου ως συνισταμένη των δύο συνιστωσών u και v, της οριζόντιας διεύθυνσης του ανέμου. Στις 21 Μαΐου 2016, στις 00UTC, όπου το βαρομετρικό χαμηλό βρίσκεται δυτικά της Ελλάδας (Σχήμα 3.1) οι άνεμοι πνέουν πάνω από τον Ελλαδικό χώρο με νοτιοανατολικές διευθύνσεις (Σχήμα 3.7). Έντονα φαινόμενα επικρατούν στη νότια Ιταλία. Στις 06UTC το βαρομετρικό χαμηλό κινείται ανατολικότερα (Σχήμα 3.1), με αποτέλεσμα την εμφάνιση ισχυρών νότιων ανέμων πάνω στην Ελλάδα. Από τις 12UTC παρατηρείται και η μεταφορά ψυχρών αερίων μαζών από τη μαύρη Θάλασσα στην ευρύτερη περιοχή της Μακεδονίας, με μορφή βορειοανατολικών ανέμων. (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7. Διεύθυνση και ταχύτητας του ανέμου (m/s), ανά 6 ώρες την 21^{η} Μαΐου 2016.

3.1.8. Θερμοδυναμική Ανάλυση

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Αναγκαία συνθήκη για τη δημιουργία καταιγίδων, όπως ήδη έχει επισημανθεί, είναι η θερμοδυναμική αστάθεια της ατμόσφαιρας. Όσο πιο ασταθής είναι η ατμόσφαιρα, τόσο πιο έντονα ανοδικά ρεύματα δημιουργούνται. Η αστάθεια κατά τη θερινή περίοδο, γενικά οφείλεται σε δυναμικό, θερμικό, ή μηχανικό αίτιο. Την 21^η Μαΐου 2016 το αίτιο δημιουργίας της αστάθειας πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος, είναι κυρίως δυναμικό και οφείλεται στην εμφάνιση του βαρομετρικού χαμηλού πάνω στην Ελλάδα. Σύμφωνα με τη διεύθυνση των ανέμων, στα χαμηλά στρώματα της τροπόσφαιρας επικρατεί θερμή μεταφορά και στα ανώτερα ψυχρή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση έντονων συνθηκών αστάθειας στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Στις 06UTC, ο άνεμος στα κατώτερα στρώματα είναι νοτιοανατολικός και στα 700 hPa μετατρέπεται (veering) σε νότιο, δηλώνοντας οριζόντια μεταφορά θερμών αερίων μαζών (warm air advection, WAA) από την επιφάνεια έως τα 700 hPa, και κατά συνέπεια, αστάθεια (Καρακώστας, 2005). Και στις δυο ραδιοβολίσεις η καμπύλη του σημείου δρόσου πλησιάζει πολύ την καμπύλη θερμοκρασίας στα 850 hPa, δηλώνοντας ότι η ατμόσφαιρα είναι κορεσμένη και υπάρχει πλήρης νεφοκάλυψη στην περιοχή ενδιαφέροντος. Οι δείκτες αστάθειας των δυο τεφιγραμμάτων (Showalter Index, Total Totals Index και K Index) δίνουν μεγάλη πιθανότητα για μεμονωμένες καταιγίδες και οπωσδήποτε όμβρους (Σχήμα 3.8).







Σχήμα 3.8. Ραδιοβολίσεις των 00UTC και 06UTC στις 21 Μαΐου 2016 (Wyoming University).

Στο τμήμα αυτό έγινε μια προσπάθεια μελέτης και ανάλυσης της συνοπτικής και θερμοδυναμικής κατάστασης ενός επεισοδίου έντονης βροχόπτωσης που έλαβε χώρα στις 21 Μαΐου του 2016, στην ευρύτερη περιοχή των Νομών Ημαθίας και Πέλλας, στη Βόρεια Ελλάδα. Σύμφωνα με όσα έχουν μελετηθεί και έχουν προαναφερθεί, τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

- Το αίτιο δημιουργίας της συγκεκριμένης καταιγιδοφόρου δραστηριότητας είναι δυναμικό και οφείλεται στην παρουσία ενός κλειστού βαρομετρικού χαμηλού στα 500 hPa. Επίσης, παρατηρήθηκε στο χάρτη επιφανείας συνεσφιγμένο μέτωπο νοτιοδυτικά της περιοχής ενδιαφέροντος (Σχήμα 3.2). Εμφανής είναι και η ύπαρξη της θετικής μεταφοράς του στροβιλισμού στην περιοχή της κεντρικής Μακεδονίας, ευνοώντας έτσι τα ανοδικά ρεύματα στην περιοχή ενδιαφέροντος (Σχήμα 3.4), με αποτέλεσμα την περαιτέρω ανάπτυξη της καταιγίδας.
- Από θερμοδυναμικής πλευράς, εκείνη την ημέρα, υπήρχαν ενδείξεις για μεμονωμένες καταιγίδες και οπωσδήποτε όμβρους. Σύμφωνα με την κατακόρυφη δομή του διανυσματικού ανέμου, στα χαμηλά στρώματα της τροπόσφαιρας επικρατεί οριζόντια μεταφορά θερμών αερίων μαζών (warm air advection, WAA), που έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση έντονων συνθηκών αστάθειας στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας.

3.2 ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ MONTEΛΟΥ WRF-ARW

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το αριθμητικό μοντέλο WRF (WRF-ARW έκδοση 3.5.1) χρησιμοποιήθηκε για τις αριθμητικές προσομοιώσεις του φαινομένου της παρούσης εργασίας. Πρόκειται για ένα σύγχρονο αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού μέσης κλίμακας, στο οποίο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες, μέσα από ένα πλήθος παραμετροποιήσεων των φυσικών διεργασιών. Για τις προσομοιώσεις με το αριθμητικό μοντέλο WRF καθορίστηκαν τρία επάλληλα εμφωλευμένα πλέγματα (one-way nesting), που καλύπτουν την Ευρώπη, τη Μεσόγειο και τις ακτές της Βόρειας Αφρικής (domain 1), την κεντρική Μεσόγειο και το μεγαλύτερο μέρος της ανατολικής Μεσογείου (domain 2) και τη βόρεια και κεντρική Ελλάδα (domain 3), με χωρική διακριτοποίηση 15km x 15km (D01), 5km x 5km (D02) και 1.667km x 1.667km (D03), αντίστοιχα. Τα στοιχεία αυτά απεικονίζονται στο Σχήμα 3.9. Ο αναφερόμενος σχεδιασμός των πλεγμάτων είναι ίδιος με αυτόν που χρησιμοποιείται στο επιχειρησιακό μοντέλο του Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (http://meteo.geo.auth.gr), γρησιμοποιώντας πλέγμα Arakawa τύπου C (Πυθαρούλης, 2014).



WPS Domain Configuration

Σχήμα 3.9. Απεικόνιση των τριών πλεγμάτων προσομοίωσης.

Για τις αρχικές και οριακές συνθήκες χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το παγκόσμιο αριθμητικό σύστημα NCEP/GFS, με χωρική διακριτοποίηση 0,25° x 0,25°, τα οποία παρέχονται στο μοντέλο ανά 6 ώρες. Το μοντέλο αρχικοποιήθηκε στις 20 Μαΐου 2016 στις 12UTC (D01), δηλαδή μια μέρα πριν την εκδήλωση του φαινόμενου και οι προσομοιώσεις είχαν διάρκεια συνολικά 36 ώρες. Αντίστοιχα τα πλέγματα D02 και D03, αρχικοποιήθηκαν ένα 6ωρο αργότερα. Η επεξεργασία των δεδομένων του μοντέλου έγινε από τις 21/5/2016 00 UTC, το πρώτο 12ωρο δεν υπολογίστηκε στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, για να μη ληφθεί υπόψη το σφάλμα λόγο του spin up του μοντέλου.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Κατά την κατακόρυφο, χρησιμοποιήθηκαν 39 σίγμα επίπεδα από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το επίπεδο των 50 hPa στην ατμόσφαιρα και για τα τρία domains.

Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκαν τρεις προσομοιώσεις με τρία διαφορετικά σχήματα μικροφυσικής των νεφών που αξιολογήθηκαν και επιλέχθηκαν στο Κεφάλαιο 2. Ως προσομοίωση αναφοράς (control experiment) θεωρήθηκε η προσομοίωση που έγινε με το σχήμα WSM6, ενώ τα WDM6 και Goddard σχήματα χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις ευαισθησίας (sensitivity experiment). Τα αποτελέσματά τους θα συγκριθούν με το control πείραμα, για τρεις διάφορες παραμέτρους, δηλαδή τη βροχόπτωση, την ανακλαστικότητα και την αναλογία μίγματος του νερού των νεφών, στο επόμενο κεφάλαιο. Σκοπός στη διατριβή αυτή είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του μοντέλου, και κυρίως της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στις μικροφυσικές διεργασίες των τριών διαφορετικών σχημάτων, στην προσομοίωση του ισχυρού επεισοδίου βροχόπτωσης που σημειώθηκε στις 21 Μαΐου 2016 στην περιοχή ενδιαφέροντος των νομών Ημαθίας και Πέλλας.

Όλες οι επιλογές των σχημάτων του μοντέλου WRF-ARW (Version 3.5.1) περιγράφονται στον Πίνακα 4. Πιο αναλυτικά, οι μικροφυσικές διεργασίες παραμετροποιούνται αρχικά από το σχήμα WSM6 – WRF Single moment 6-Class microphysics scheme (Hong and Lim 2006), και ύστερα από τα άλλα δυο σχήματα της μικροφυσικής, το WDM6 – WRF Double moment 6-Class microphysics scheme (Lim and Hong 2010) και το Goddard Single moment 6-Class microphysics scheme (Tao and Simpson 1993, Tao et al., 2003). Τα υπόλοιπα σχήματα παραμετροποίησης που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο, είναι τα ίδια για τις τρεις προσομοιώσεις.

Οι διεργασίες της ακτινοβολίας (μικρού/μεγάλου μήκους κύματος) περιγράφονται από το σχήμα RRTMG – Rapid Radiative Transfer Model (Iacono et al., 2008), ενώ

το σχήμα MYJ – Mellor Yamada Janjic (Janjic 1994) επιλέχθηκε για το πλανητικό οριακό στρώμα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Οι φυσικές διεργασίες του εδάφους αναπαρίστανται από το NOAH Land Surface Model (Chen et al., 2001) με τέσσερα υπεδάφια στρώματα, ενώ για το επιφανειακό στρώμα η επιλογή ήταν το σχήμα των Monin-Obukhov όπως χρησιμοποιείται στο μοντέλο Eta (Janjic 1996). Τέλος, η παραμετροποίηση της κατακόρυφης μεταφοράς των σωρρειτόμορφων νεφών έγινε μόνο στα D01 και D02, με το σχήμα BMJ - Betts Miller Janjic (Janjic 1994).

Περισσότερες πληροφορίες και βιβλιογραφία για το μοντέλο WRF-ARW υπάρχουν στις εργασίες των Skamarock et al., (2008) και Wang et al., (2010).

	Control	1 st sensitivity experiment	2 nd sensitivity experiment
Radiation (SW-LW)	RRTMG	RRTMG	RRTMG
Microphysics	WSM6	WDM6	GODDARD
SFC Layer	ETA	ETA	ETA
Cumulus	BMJ	BMJ	BMJ
PBL	МҮЈ	МҮЈ	MYJ
LSM	NOAH	NOAH	NOAH

Πινάκας 4. Επιλογές σχημάτων παραμετροποίησης του μοντέλου WRF.



4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

κεφαλαίυ

Α.Π.Θ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων όσον αφορά στην επίδραση των παραμετροποιήσεων των προσεγγιστικών σχημάτων της μικροφυσικής που υιοθετήθηκαν σε διάφορες μετεωρολογικές παραμέτρους άμεσα συνδεδεμένες με τη βροχόπτωση. Για να διαπιστωθεί ποιο από τα τρία σχήματα της μικροφυσικής περιγράφει καλύτερα το ισχυρό επεισόδιο της βροχόπτωσης που σημειώθηκε στις 21 Μαΐου 2016 στην περιοχή της κεντρικής Μακεδονίας και δίνει πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα, πραγματοποιήθηκε η μελέτη πολλών μετεωρολογικών παραμέτρων, όπως: θερμοκρασία, άνεμος στα 10m, σχετική υγρασία και ατμοσφαιρική πίεση. Έμφαση όμως δίνεται στις παραμετροποιήσεις της αθροιστικής ημερήσιας βροχόπτωσης, της ανακλαστικότητας, της αναλογίας μίγματος του νερού των νεφών και της συνολικής ποσότητας των παγοσωματιδίων τύπου graupel.

Πραγματοποιήθηκαν τρεις προσομοιώσεις με τρία διαφορετικά σχήματα μικροφυσικής των νεφών και συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Είναι απαραίτητο να τονιστεί, ότι η προσομοίωση που έγινε με το σχήμα WSM6 θεωρείται ως η προσομοίωση αναφοράς (control experiment), ενώ για τις προσομοιώσεις ευαισθησίας (sensitivity experiments) χρησιμοποιήθηκαν τα σχήματα WDM6 και Goddard.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ευαισθησίας θα συγκριθούν με την προσομοίωση αναφοράς (control experiment), για τις παραμέτρους που έχουν προαναφερθεί (βροχόπτωση, ανακλαστικότητα και προφίλ των υδρομετεώρων) και θα παρουσιαστούν αναλυτικά. Τα πειράματα ευαισθησίας έγιναν με σκοπό να αξιολογηθεί η ικανότητα του εκάστοτε σχήματος-μοντέλου στην αναπαράσταση του υετού εν γένει, αλλά και για να ελεγχθεί η συμπεριφορά των διαφορετικών σχημάτων παραμετροποιήσεων της μικροφυσικής σε ένα έντονο επεισόδιο βροχόπτωσης που έχει επιλεγεί.

4.1.1. Σύγκριση της συνοπτικής κατάστασης στα πειράματα ευαισθησίας

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τα σχήματα που ακολουθούν (4.1, 4.2, 4.3 και 4.4) προέκυψαν από τις προσομοιώσεις των τριών σχημάτων της μικροφυσικής των νεφών, των WSM6, WDM6 και Goddard, από το περιοχικό μοντέλο WRF-ARW, στο domain 3 για τη σχετική υγρασία στην ισοβαρική επιφάνεια των 700 hPa και στο domain 2 για τρία πολύ βασικά πεδία, αυτά της ατμοσφαιρικής πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας και του γεωδυναμικού ύψους στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 και 850 hPa.

Ο αντικειμενικός σκοπός είναι να παρουσιαστεί και να εκτιμηθεί ο τρόπος που αποτυπώνουν τα τρία επιλεγμένα σχήματα και την καλύτερη κατανόηση των διαφορών που εμφανίζουν αυτά στην περιοχή της κεντρικής Μακεδονίας, με βάση τη συνοπτική εικόνα της ατμόσφαιρας, κατά την προσομοίωση του έντονου επεισοδίου της βροχόπτωσης που σημειώθηκε στις 21 Μαΐου 2016.

Οι προσομοιώσεις της σχετικής υγρασίας, που έγιναν με το μοντέλο WRF στην ισοβαρική επιφάνεια των 700 hPa, με τα τρία σχήματα της μικροφυσικής -δηλαδή το WSM6, το WDM6 και το Goddard- στο domain 3, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1, και εμφανίζουν υψηλά ποσά σχετικής υγρασίας (>90%) στη μεγαλύτερη έκταση της περιοχής ενδιαφέροντος. Εξαιτίας του βαρομετρικού συστήματος και της αυξημένης σχετικής υγρασίας, υπήρχε νεφοκάλυψη και έντονες βροχοπτώσεις.

Η προσομοίωση αναφοράς (control experiment), WSM6, και το σχήμα WDM6, εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά στην προσομοίωση της σχετικής υγρασίας, με ελάχιστες διαφορές στις τιμές που απεικονίζονται σε κάποιες περιοχές στο Σχήμα 4.1 (α και β). Απεναντίας, το σχήμα Goddard παρουσιάζει διαφορετική εικόνα, σε σχέση με τα δυο προαναφερθέντα σχήματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1γ. Γεγονός είναι ότι σχεδόν σε όλη την περιοχή εμφανίζονται μεγάλες τιμές υγρασίας (>90%).





Init: 2016-05-20_18:00:00 Valid: 2016-05-21_12:00:00

REAL-TIME WRF	WDM6	Init: 2016-05-20_18:00:00 Valid: 2016-05-21_12:00:00



Relative Humidity (%) at 700 hPa



Σχήμα 4.1. Απεικόνιση της σχετικής υγρασίας (%) στην ισοβαρική επιφάνεια των 700 hPa, την 21^η Μαΐου 2016 στις 12UTC, από το υψηλής ανάλυσης πλέγμα για τις προσομοιώσεις: α) WSM6, β) WDM6 και γ) Goddard, του WRF-ARW.

Στις 21 Μαΐου 2016 στις 12UTC, η εικόνα που προσομοιώνουν το control και το WDM6 σχήμα, όσον αφορά το γεωδυναμικό ύψος στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa είναι παρόμοια (Σχήμα 4.2 α και β). Ένα κλειστό βαρομετρικό σύστημα εμφανίζεται στη Βόρεια Ελλάδα πάνω από την περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας στο επίπεδο των 500 hPa, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2 (α και β). Όπως παρατηρείται και από τα τρία σχήματα, στις 18 UTC το κλειστό βαρομετρικό σύστημα έχει περάσει από την περιοχή μελέτης και κατευθύνεται προς τα νότια και ανατολικά της κεντρικής Μακεδονίας, σύμφωνα με το Σχήμα 4.2 (α, β και γ). Η ύπαρξη του κλειστού βαρομετρικού χαμηλού είναι εμφανής και από τα δυο σχήματα (WSM6 και WDM6) και στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa, μετατοπισμένο πιο νότια και ανατολικά από το χαμηλό που προσομοιώθηκε στο επίπεδο των 500 hPa (Σχήμα 4.3 α και β). Με το σχήμα Goddard το κλειστό σύστημα γεωδυναμικών υψών στο επίπεδο των 500 hPa και των 850 hPa (Σχήμα 4.2 γ και Σχήμα 4.3 γ), παρατηρείται πιο νότια από αυτό που προσομοιώνουν τα δυο προαναφερθέντα σχήματα, ανατολικά της Θεσσαλίας, πάνω από το Αιγαίο Πέλαγος. Λόγω της θέσης του χαμηλού, θερμές και υγρές αέριες μάζες από νοτιότερες περιοχές μετακινούνται -διαμέσου του Θερμαϊκούπρος την περιοχή της κεντρικής Μακεδονίας.

Επομένως, η θέση του κλειστού βαρομετρικού συστήματος έχει διαφορετική συνεισφορά στο ποσό της υγρασίας που εμφανίζει στην περιοχή ενδιαφέροντος. Επίσης, στις 12 UTC, τα σχήματα WSM6 και WDM6 εμφανίζουν χαμηλές ατμοσφαιρικές πιέσεις (964 hPa) στην περιοχή μελέτες (Σχήμα 4.4 α και β), ενώ για το Goddard αντίστοιχα, η πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας είναι αρκετά υψηλότερη (980 hPa, Σχήμα 4.4 γ).

Συγκρίνοντας τους χάρτες επιφανείας (Σχήμα 4.4) πάνω από την ευρύτερη περιοχή της κεντρικής Μακεδονίας και των αντίστοιχων χαρτών του γεωδυναμικού ύψους στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa και 850 hPa (Σχήμα 4.2 και Σχήμα 4.3), παρατηρείται ότι το βαρομετρικό χαμηλό που πέρασε από την Ελλάδα παρουσιάζει μια κλίση προς τα δυτικά, καθ' ύψος, και για τα τρία σχήματα της μικροφυσικής των νεφών (WSM6, WDM6 και Goddard). Σύμφωνα με τη θεωρία της βαροκλινικής αστάθειας (Καρακώστας, 2004), το σύστημα ήταν σε φάση ανάπτυξης και ενίσχυσης, μετατρέποντας την υφιστάμενη κινητική ενέργεια σε δυναμική, με αποτέλεσμα στην περιοχή ενδιαφέροντος να δημιουργούνται έντονες ανοδικές κινήσεις αερίων μαζών και να ευνοείται η ανάπτυξη καταιγίδων.



α) WSM6: gT500

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- 74 -



γ) Goddard: gT500



Σχήμα 4.2. Γεωδυναμικό ύψος (gpm) και θερμοκρασία (°C) στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa, την 21^η Μαΐου 2016, στις 12 και 18 UTC στο domain 2, για τις προσομοιώσεις: α) WSM6, β) WDM6 και γ) Goddard, του WRF-ARW. Ισοϋψείς ανά 40 γεωδυναμικά μέτρα.











Σχήμα 4.3. Γεωδυναμικό ύψος (gpm) και θερμοκρασία (°C) στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa, την 21^η Μαΐου 2016, στις 12 και 18 UTC στο domain 2, για τις προσομοιώσεις: α) WSM6, β) WDM6 και γ) Goddard, του WRF-ARW. Ισοϋψείς ανά 20 γεωδυναμικά μέτρα.











γ) Goddard: SLP



18 UTC



0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

Σχήμα 4.4. Χάρτες ατμοσφαιρικής πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa) και θερμοκρασία 2m (°C) την 21^η Μαΐου 2016, στις 12 και 18 UTC στο domain 2, για τις προσομοιώσεις: α) WSM6, β) WDM6 και γ) Goddard, του WRF-ARW. Ισοϋψείς ανά 4 γεωδυναμικά μέτρα.

4.2 ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ 24ΩΡΟΥ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η έναρξη του επεισοδίου της ισχυρής βροχόπτωσης ήταν στις 12 UTC21 της 21^{ης} Μαΐου 2016. Ένα 6ωρο μετά, το επεισόδιο αρχίζει να εξασθενεί. Στην ανάλυση που ακολουθεί, λαμβάνονται υπόψη οι συνοπτικές συνθήκες που επικράτησαν εκείνη την ημέρα, τόσο από τις αναλύσεις του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων – ECMWF, (η περιγραφή των οποίων έγινε στο κεφάλαιο 3), όσο και από τα πειράματα ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκαν.

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η αθροιστική βροχόπτωση του 24 ώρου σε mm, για την 21^η Μαΐου 2016. Η περιοχή που επιλέχθηκε για τις προσομοιώσεις των τριών σχημάτων της μικροφυσικής, δηλαδή των WSM6, WDM6 και Goddard, με το αριθμητικό μοντέλο WRF, περιλαμβάνει τη βόρεια και κεντρική Ελλάδα (domain 3), με χωρική διακριτοποίηση 1.667km x 1.667km. Η αρχικοποίηση του εσωτερικού πλέγματος υψηλής ανάλυσης έγινε στις 20/5/2016 στις 18 UTC. Ο υπολογισμός της ημερήσιας αθροιστικής βροχόπτωσης έγινε για την 21^η Μαΐου 2016, χωρίς όμως να υπολογιστεί στις μετρήσεις το σφάλμα του μοντέλου λόγο spin up.

Τα τρία σχήματα μικροφυσικής εμφανίζουν διαφορές, τόσο ως προς τη χωρική κατανομή της βροχόπτωσης, όσο και στην έντασή της. Η προσομοίωση με το σχήμα WDM6 εμφανίζει μεγαλύτερο ύψος της ημερήσιας αθροιστικής βροχόπτωσης, που φτάνει τα 236 mm, σε σύγκριση με το σχήμα WSM6 που δίνει 141 mm πάνω από την περιοχή μελέτης (Σχήμα 4.5 α και β). Σε παρόμοια αποτελέσματα κατέληξαν στις έρευνες τους και οι Shi et al., (2007); Lim and Hong, (2010); Wu D. et al., (2013); Song, H. J. & Sohn, B. J., (2018), σύμφωνα με τους οποίους το σχήμα μικροφυσικής WDM6 έχει την τάση να εμφανίζει μεγαλύτερο ημερήσιο ύψος της αθροιστικής βροχόπτωσης κυρίως πάνω από χερσαίες περιοχές, σε σχέση με το σχήμα WSM6.



Σχήμα 4.5. Αθροιστική βροχόπτωση 24ώρου (σε mm) την 21^η Μαΐου 2016, από το υψηλής ανάλυσης πλέγμα για τις προσομοιώσεις: α) WSM6, β) WDM6 και γ) Goddard, του WRF-ARW (χωρίς spin up).

Όσον αφορά στην ένταση της βροχόπτωσης, στις προσομοιώσεις που έγιναν με το μοντέλο WRF-ARW (Σχήμα 4.6 α), το WDM6 φαίνεται ότι υπερεκτιμά τα τοπικά μέγιστα της έντονης βροχόπτωσης σε σχέση με το control πείραμα. Από τις διαφορές των δυο σχημάτων (Σχήμα 4.6 α), φαίνεται ότι το WDM6 δημιουργεί ένα ισχυρό τοπικό μέγιστο της έντασης της βροχόπτωσης στην οροσειρά του Ολύμπου. Αυτό ίσως να οφείλεται στο ότι, σε εκείνη την περιοχή εμφανίζονται πολύ μεγάλες τιμές σχετικής υγρασίας στα 700 hPa (Σχήμα 4.1 β), ενώ παρατηρούνται αρνητικές διαφορές στην ημερήσια αθροιστική βροχόπτωση που ξεπερνούν τα 80 mm (Σχήμα 4.6 α). Από την άλλη μεριά, θετικές διαφορές της τάξης των 80 mm εμφανίζονται στις πλαγιές του όρους Χολομώντα στην κεντρική Χαλκιδική, έχοντας ως αποτέλεσμα στην περιοχή αυτή το WSM6 σχήμα να δίνει μεγαλύτερα ημερήσια ύψη βροχής συγκριτικά με το σχήμα WDM6.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Συγκρίνοντας τις δυο εικόνες (α και β) του Σχήματος 4.1, καταλήγουμε στο ίδιο συμπέρασμα καθώς, στην περιοχή της κεντρικής Χαλκιδικής, το σχήμα WSM6 προσομοίωσε μεγαλύτερη έκταση υψηλών τιμών υγρασίας από το σχήμα WDM6. Στην περιοχή μελέτης, οι διαφορές στα ύψη της βροχής δεν είναι σημαντικές, με το σχήμα WDM6 να εμφανίζει ελάχιστα μεγαλύτερες τιμές (Σχήμα 4.6 α). Αυτό οφείλεται στο ότι, στην περιοχή αυτή, τα ποσό της σχετικής υγρασίας που προσομοιώνουν και τα δυο σχήματα διαφέρει ελάχιστα (Σχήμα 4.1 α και β).

Οι Lim and Hong, (2010), Wu D. et al., (2013) και Song, H. J. & Sohn, B. J. (2018) έδειξαν ότι η επιλογή του σχήματος WDM6 οδηγεί σε πολύ συχνή ενεργοποίηση των ανοδικών κινήσεων και υπερεκτίμηση των τοπικών μεγίστων της έντονης βροχόπτωσης στις προσομοιώσεις. Ο διαφορετικός τρόπος που διαχειρίζεται τα θερμά νέφη (ως double-moment σχήμα) σύμφωνα με τις παραμετροποιήσεις των Hong et al., (2004) και Hong and Lim (2006), καθώς και η προσθήκη των προγνωστικών εξισώσεων του αριθμού συγκέντρωσης των πυρήνων συμπύκνωσης CCN στο σχήμα WDM6, ευνοεί τη δημιουργία νεφοσταγονιδίων (με συμπύκνωση των υδρατμών πάνω σε αυτούς), επομένως, υπάρχει άμεση επίδραση στην αθροιστική βροχόπτωση (Hong and Lim 2010).



-80 -70 -60 -50 -40 -30 -20 -10 0 10 20 30 40 50 60 70 80

Σχήμα 4.6. Διαφορές μεταξύ των σχημάτων στην αθροιστική βροχόπτωση 24ώρου (σε mm) κατά την 21^η Μαΐου 2016, από το υψηλής ανάλυσης πλέγμα για τις προσομοιώσεις: α) WSM6 - WDM6 και β) WSM6 - Goddard του WRF-ARW (χωρίς spin up). Αντιθέτως, η προσομοίωση με το σχήμα Goddard έδωσε ελαφρώς μικρότερο ημερήσιο ύψος της αθροιστικής βροχόπτωσης (τοπικό μέγιστο 128 mm) από το WSM6 (Σχήμα 4.5 γ). Σε παρόμοιο συμπέρασμα είχαν καταλήξει και οι Tao et al., (2009), σύμφωνα με τους οποίους, το σχήμα Goddard υπερεκτιμά την ασθενή βροχόπτωση, ενώ υποεκτιμά την έντονη βροχή και δεν προσομοιώνει τόσο καλά τα ισχυρά τοπικά μέγιστα της βροχής. Επίσης, το σχήμα Goddard εμφανίζει πιο διευρυμένη και όχι τόσο έντονη γραμμή ανωμεταφοράς, απ' ότι εμφανίζουν οι προσομοιώσεις με το WSM6. Το Goddard μπορεί να μην εμφανίζει ισχυρά τοπικά μέγιστα όπως το σχήμα WSM6, αλλά αθροιστικά έχει δώσει, στη μεγαλύτερη έκταση του domain, ύψη βροχής που ξεπερνούν τα 35mm (Σχήμα 4.5 γ). Επομένως, προσομοιώνει μια πιο διευρυμένη περιοχή υψηλών ποσών βροχής. Πιθανότατα, ο λόγος της διαφορετικής συμπεριφοράς του Goddard σε σχέση με το control πείραμα είναι η θέση του χαμηλού όπως απεικονίζεται στα Σχήματα 4.2 γ και 4.3 γ.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στο Σχήμα 4.6 β απεικονίζονται οι διαφορές των δυο σχημάτων (WSM6 -Goddard) και παρατηρούνται παρόμοια αποτελέσματα με αυτά των Tao et al., (2009). Το Goddard σε σχέση με το WSM6 υποεκτιμά τα τοπικά μέγιστα της έντονης βροχόπτωσης. Παρατηρούνται θετικές διαφορές στην ημερήσια αθροιστική βροχόπτωση που φτάνουν τα 77 mm, στην οροσειρά του Ολύμπου (Σχήμα 4.6 β).

Απεναντίας, αρνητικές διαφορές που ξεπερνούν τα 80 mm (Σχήμα 4.6 β) εμφανίζονται κατά μήκος των "ποδιών" της Χαλκιδικής, πάνω από το Αιγαίο Πέλαγος, έχοντας ως αποτέλεσμα, στην περιοχή αυτή, το σχήμα Goddard να δίνει μεγαλύτερα ημερήσια ύψη βροχής συγκριτικά με το σχήμα WSM6. Αυτό οφείλεται στην αυξημένη υγρασία που εμφανίζει σε αυτήν την περιοχή το Goddard, σε σχέση με το control πείραμα (Σχήμα 4.1 α και γ). Στην περιοχή των νομών Ημαθίας και Πέλλας, οι διαφορές των δυο σχημάτων είναι αρνητικές, που σημαίνει ότι το Goddard δίνει μεγαλύτερα ημερήσια ύψη βροχής από το WSM6 (Σχήμα 4.6 β), καθώς εμφανίζει και σχετική υγρασία μεγαλύτερη από 90% στην περιοχή ενδιαφέροντος (Σχήμα 4.1 γ), σε αντίθεση με το control πείραμα που εμφανίζει σε κάποια σημεία της ίδιας περιοχής μικρότερες τιμές (Σχήμα 4.1 α).

4.3 ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Οι μέγιστες ανακλαστικότητες των κυττάρων, δηλαδή τα επιστρέφοντα σήματα στο ραντάρ, μετρούνται σε dBz και εξετάζονται ως προς την έντασή τους. Η ανακλαστικότητα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συγκέντρωση και από το είδος των υδρομετεώρων (στην παρούσα εργασία εξετάζονται η αναλογία μίγματος του νερού των νεφών – QCLOUD και η συνολική ποσότητα των graupel), που λαμβάνει υπόψη το ραντάρ, καθώς επίσης και από την κατανομή του μεγέθους αυτών.

Στο σχήμα 4.7 (α και β), τα δυο σχήματα της μικροφυσικής των νεφών WSM6 και WDM6, εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά, όσον αφορά στην ανακλαστικότητα, με κάποιες μικρές διάφορες στην έντασή της. Στις 12UTC (Σχήμα 4.7.α και β) όπου παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές της ανακλαστικότητας κατά την εκδήλωση του επεισοδίου της βροχόπτωσης, τα αποτελέσματα των δυο σχημάτων δείχνουν να είναι σε σχεδόν καλή συμφωνία μεταξύ τους, με το WDM6 (max =58 dBZ) να εμφανίζει ελάχιστα πιο έντονη ανακλαστικότητα από το WSM6 (max = 50 dBZ).

Σε παρόμοια αποτελέσματα κατέληξαν στις έρευνες τους οι Kain et al., (2008), Lim and Hong, (2010), Wu D. et al., (2013) Kai Song, H. J. & Sohn, B. J. (2018), σύμφωνα με τους οποίους οι διαφορές στα δυο σχήματα οφείλονται στο γεγονός ότι το WDM6 διαχειρίζεται με διαφορετικό τρόπο τις διεργασίες της αυτό-μετατροπής (autoconversion) και συσσωμάτωσης (accretion) που λαμβάνουν χώρα στα θερμά νέφη, σε σχέση με το WSM6, ενώ οι υπόλοιπες μικροφυσικές διεργασίες είναι οι ίδιες με αυτές του WSM6 σχήματος. Παρόλο που για τα ψυχρά νέφη (ice phase) το WDM6 ακολουθεί τους ίδιους μηχανισμούς δημιουργίας των κατακρημνισμάτων με το WSM6, οι ίδιες παραμετροποιήσεις θα ενεργούν διαφορετικά στα δύο σχήματα, καθώς στο σχήμα WDM6 προστίθενται και οι προγνωστικές εξισώσεις του αριθμού concentration) $\tau \omega v$ νεφοσταγόνων συγκέντρωσης (number Nc και των βρογοσταγόνων N_R, οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά όλες τις διεργασίες παγοποίησης που συμβαίνουν στα ψυχρά νέφη (Lim and Hong, 2010).





β) WDM6: 06 - 09 - 12 - 15 - 18 UTC





Σχήμα 4.7. Απεικόνιση της μέγιστης ανακλαστικότητας (σε dBz) την 21^η Μαΐου 2016, για τις 06-09-12-15-18UTC από το υψηλής ανάλυσης πλέγμα για τις προσομοιώσεις: α) WSM6, β) WDM6 και γ) Goddard, του WRF-ARW.

Ομοίως και το σχήμα Goddard προσομοιώνει με διαφορετικό τρόπο την ανακλαστικότητα από το WSM6, εμφανίζοντας ελάχιστα μεγαλύτερες τιμές κατά τη διάρκεια του επεισοδίου της έντονης βροχόπτωσης (Σχήμα 4.7 α και γ). Στις 12 UTC παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές ανακλαστικότητας, οι οποίες διαφέρουν ελάχιστα στα δυο σχήματα (53 dBz για το Goddard και 50 dBz για το WSM6). Οι μεγαλύτερες τιμές της ανακλαστικότητας οφείλονται, όπως θα δούμε και στην επόμενη παράγραφο, στο μεγάλο αριθμό συγκέντρωσης σωματιδίων graupel που εμφανίζουν οι προσομοιώσεις με το σχήμα Goddard.

Επιπρόσθετα, σε παρόμοια αποτελέσματα κατέληξαν στην έρευνά τους και οι Wu D. et al., (2013), οι οποίοι αναφέρουν ότι το σχήμα Goddard εμφανίζει ελαφρώς πιο έντονη ανακλαστικότητα πάνω από την περιοχή σχηματισμού των κυττάρων της καταιγίδας, καθώς οι μικροφυσικές διεργασίες που ευθύνονται για τη δημιουργία και για το μετασχηματισμό των παγοσωματιδίων (τύπου graupel) στα νέφη όπου λαμβάνουν χώρα οι διεργασίες μικτής φάσης (mixed-phase), ενεργοποιούν πιο εύκολα τις ανοδικές κινήσεις από το σχήμα WSM6.

α) WSM6 - WDM6: 06 – 12 – 18 UTC

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη







REAL-TIME WRF

Init: 2016-05-20_18:00:00 Valid: 2016-05-21_18:00:00



Σχήμα 4.8. Διαφορές μεταξύ σχημάτων στη μέγιστη ανακλαστικότητα (σε dBz) την 21^η Μαΐου 2016, για τις 06-12-18UTC από το υψηλής ανάλυσης πλέγμα για τις προσομοιώσεις: α) WSM6 - WDM6 και β) WSM6 – Goddard, του WRF-ARW.

Στις 12UTC και στις 18UTC (Σχήμα 4.8 α) το WSM6 εμφανίζει μια πιο διευρυμένη περιοχή με μεγαλύτερες τιμές ανακλαστικότητας, οι διαφορές των δυο σχημάτων WSM6 - WDM6 είναι θετικές (30-40 dBZ) σχεδόν στην μεγαλύτερη έκταση της κεντρικής Μακεδονίας. Απεναντίας το WDM6 εμφανίζει πιο έντονες ανακλαστικότητες σε μεμονωμένες περιοχές (Σχήμα 4.8 α). Οι αρνητικές διαφορές που εμφανίζει η προσομοίωση της διαφοράς των δυο σχημάτων, φτάνουν μέχρι και τα 50 dBz.

Μικρές είναι οι διαφορές που εμφανίζονται στην προσομοίωση των σχημάτων WSM6 – Goddard από το μοντέλο WRF, για τις 06-12-18UTC, οι οποίες απεικονίζονται στο Σχήμα 4.8 β. Πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος, στις 18UTC, οι διαφορές είναι αρνητικές, με τιμές που κυμαίνονται από 20 έως 40 dBz. Παρατηρώντας το Σχήμα 4.7 (α και γ) όπως επίσης και το Σχήμα των διαφορών 4.8 β, στις 18UTC, διαπιστώνεται ότι το σχήμα Goddard δίνει μεγαλύτερες τιμές ανακλαστικότητας στους Νομούς Ημαθίας και Πέλλας από το WSM6.

4.4 ΠΡΟΦΙΛ ΤΩΝ ΥΔΡΟΜΕΤΕΩΡΩΝ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Οι φυσικοί μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα (όπως τα νέφη και ο υετός), επειδή δεν μπορούν να αναλυθούν από το μοντέλο λόγο ανεπαρκούς χωρικής ανάλυσης, είτε αναπαριστάνονται στα σημεία πλέγματος, είτε λαμβάνονται υπόψη μέσω παραμετροποιήσεων. Στο αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού WRF, η υγρασία συνήθως εκφράζεται ως αναλογία μίγματος (kg νερού ανά kg ξηρού αέρα), για τα διάφορα υδρομετέωρα. Το αριθμητικό μοντέλο WRF, με τη μεταβλητή QCLOUD, υπολογίζει ότι θεώρει αυτό ως νέφος παρέχοντας σημαντικές πληροφορίες για τη νεφική μάζα του συστήματος, καθώς και για το ύψος που μπορεί να έχουν οι κορυφές των νεφών.

Για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των σχημάτων της μικροφυσικής των νεφών στο έντονο επεισόδιο της βροχόπτωσης, έγιναν προσομοιώσεις με τα τρία σχήματα για την αναλογία μίγματος του νερού των νεφών QCLOUD σε διάφορα ισοβαρικά επίπεδα (500, 700 και 850 hPa), καθώς επίσης υπολογίστηκε και η συνολική ποσότητα των graupel σε mm που σημειώθηκε εκείνη την ημέρα. Στο Σχήμα 4.9 προσομοιώνεται η αναλογία μίγματος του νερού των νεφών QCLOUD (σε kg/kg) στο επίπεδο των 500 hPa, την 21^η Μαΐου 2016, για τις 12 UTC, από το υψηλής ανάλυσης πλέγμα για τις προσομοιώσεις: α) WSM6, β) WDM6 και γ) Goddard, του WRF-ARW. Παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα που σημειώθηκαν στις 12 UTC, καθώς ήταν η μοναδική ώρα κατά τη διάρκεια της ημέρας που εμφάνισε κάποια αξιόλογα ποσά QCLOUD.



Σχήμα 4.9. Αναλογία μίγματος του νερού των νεφών QCLOUD (σε kg/kg) στο επίπεδο των 500 hPa, την 21^η Μαΐου 2016, για τις 12 UTC, από το υψηλής ανάλυσης πλέγμα για τις προσομοιώσεις: α) WSM6, β) WDM6 και γ) Goddard, του WRF-ARW.

Στις 12 UTC, το σχήμα WSM6 εμφανίζει σημαντικά ποσά QCLOUD στο ισοβαρικό επίπεδο των 500 hPa (Σχήμα 4.9 α), που σημαίνει ότι υπάρχει διαθέσιμη ποσότητα υγρασίας για να μετασχηματιστεί σε υδρομετέωρα, όπως το χαλάζι ή graupel. Επίσης, μπορεί να εκτιμηθεί ότι η κορυφή της νεφικής μάζας του συστήματος ανέρχεται περίπου στα 5500m. Το control πείραμα προσομοιώνει αξιόλογες τιμές υγρασίας των νεφών κυρίως κατά μήκος της κεντρικής Χαλκιδικής (με τιμές αναλογίας μίγματος στα 0,003 kg/kg), στην οροσειρά του Ολύμπου (στα 0,002 kg/kg), ενώ στην περιοχή ενδιαφέροντος οι τιμές είναι μικρότερες, στα 0,001 kg/kg (Σχήμα 4.9 α). Από την άλλη μεριά το σχήμα WDM6 φαίνεται να εμφανίζει μικρότερες τιμές QCLOUD και σε πιο μεμονωμένες περιοχές από το WSM6 (Σχήμα 4.9 β), κυρίως στην περιοχή της κεντρικής Χαλκιδικής.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

(a)

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το σχήμα Goddard παρουσιάζει μια διαφορετική εικόνα από το σχήμα WSM6, καθώς δεν μπορεί να αναπαράγει τα ανάλογα ποσά QCLOUD που προσομοιώθηκαν στο σχήμα WSM6.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα Σχήματα 4.9 και 4.10, όπου αναφέρονται επίσης στην αναλογία μίγματος του νερού των νεφών QCLOUD (σε kg/kg) στο επίπεδο των 700 και 850 hPa, κατά την 21^η Μαΐου 2016, για τις 06-12 UTC, από το υψηλής ανάλυσης πλέγμα για τις προσομοιώσεις των τριών σχημάτων (WSM6, WDM6 και Goddard) του WRF-ARW.

Το ισοβαρικό επίπεδο των 700 hPa εμφανίζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον όσον αφορά τη μελέτη της αναλογίας μίγματος των υδρομετεώρων και πιο συγκεκριμένα της υγρασίας των νεφών, καθώς αποδεικνύεται ότι τα περισσότερα μετωπικά συστήματα έχουν το μεγαλύτερο μέρος της νεφικής τους μάζας συγκεντρωμένο μεταξύ 1.5 - 4.5 km.









Σχήμα 4.10. Αναλογία μίγματος του νερού των νεφών QCLOUD (σε kg/kg) στο επίπεδο των 700 hPa, την 21^η Μαΐου 2016, για τις 06-12 UTC από το υψηλής ανάλυσης πλέγμα για τις προσομοιώσεις: α) WSM6, β) WDM6 και γ) Goddard, του WRF-ARW.



Σχήμα 4.11. Αναλογία μίγματος του νερού των νεφών QCLOUD (σε kg/kg) στο επίπεδο των 850 hPa, την 21^η Μαΐου 2016, για τις 06-12 UTC από το υψηλής ανάλυσης πλέγμα για τις προσομοιώσεις: α) WSM6, β) WDM6 και γ) Goddard, του WRF-ARW.

Το σχήμα WSM6 εμφανίζει, από τις 06 UTC στο ισοβαρικό επίπεδο των 700 hPa (Σχήμα 4.10 α) τα πρώτα κύτταρα της καταιγίδας στην ορεινή Χαλκιδική (με τιμές αναλογίας μίγματος μεγαλύτερες από 0,008 kg/kg), ενώ απεναντίας, το σχήμα WDM6 δε δίνει καθόλου τιμές στη συγκεκριμένη περιοχή (Σχήμα 4.10 β). Ομοίως και στις 12 UTC, όπου φαίνεται καθαρά η εξέλιξη των κύτταρων της καταιγίδας, το σχήμα WSM6 προσομοιώνει μια πιο διευρυμένη περιοχή υψηλών ποσών αναλογίας μίγματος (με τιμές αναλογίας μίγματος, κατά μέσο όρο στα 0,01 kg/kg) συγκριτικά με το σχήμα WDM6 (με τιμές QCLOUD περίπου στα 0,004 kg/kg), (Σχήμα 4.10 α και β). Στο Σχήμα 4.1(α και β), καταλήξαμε στο ίδιο συμπέρασμα, όπου το σχήμα WSM6 στην περιοχή της κεντρικής Χαλκιδικής προσομοίωσε μεγαλύτερη έκταση υψηλών τιμών υγρασίας από το σχήμα WDM6 και αυτός είναι και ο λόγος που προσομοίωσε μεγαλύτερα ημερήσια ύψη βροχής συγκριτικά με το σχήμα WDM6 στη συγκεκριμένη περιοχή. Όσον αφορά στην περιοχή ενδιαφέροντος, τα δυο προαναφερθέντα σχήματα εμφανίζουν παρόμοια εικόνα στις τιμές του QCLOUD, αφού και το ποσό της σχετικής υγρασίας που προσομοιώνουν τα δυο σχήματα δε διαφέρει σημαντικά (Σχήμα 4.1 α και β), με το σχήμα WSM6 να εμφανίζει ελάχιστα μεγαλύτερες τιμές που σε μεμονωμένες περιοχές φτάνουν και τα 0,012 kg/kg.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι και στα 850 hPa στις 12UTC, το control και το WDM6 σχήμα παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά με αυτή που εμφάνισαν στο ισοβαρικό επίπεδο των 700 hPa, με το σχήμα WSM6 να προσομοιώνει μεγαλύτερη έκταση υψηλών τιμών αναλογίας μίγματος από το σχήμα WDM6, έπειτα από τη σύγκριση τους (Σχήμα 4.11 α και β).

Σε παρόμοια αποτελέσματα κατέληξαν στις έρευνες τους και οι Lim and Hong, (2010), Wu D. et al., (2013) και Song, H. J. & Sohn, B. J., (2018), σύμφωνα με τους οποίους, το σχήμα μικροφυσικής WDM6 έχει την τάση να εμφανίζει μικρότερες τιμές για το QCLOUD από το σχήμα WSM6. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της έντονης αύξησης του μεγέθους των νεφοσταγόνων, λόγο της σύγκρουσής και της συγχώνευσής τους (collision-coalescence) με τα μικρά σταγονιδία της βροχής, που παρασύρουν κατά τη πτώση τους (Song, H. J. and Sohn, B. J. 2018).

Από την άλλη μεριά, στις 12UTC στα 700 hPa, το σχήμα Goddard (Σχήμα 4.10 γ) εμφανίζει μεμονωμένα κύτταρα με μεγαλύτερες τιμές αναλογίας μίγματος (έως και 0,012 kg/kg), σε σχέση με το control (με τιμές αναλογίας μίγματος κατά μέσο όρο στα 0,01 kg/kg), κατά μήκος των "ποδιών" της Χαλκιδικής, έχοντας ως αποτέλεσμα στην περιοχή αυτή το σχήμα Goddard να δίνει μεγαλύτερα ημερήσια ύψη βροχής

συγκριτικά με το σχήμα WSM6 (Σχήμα 4.6 β). Στη συνολική του εικόνα όμως το σχήμα Goddard στα 700 hPa και στα 850hPa, στην ευρύτερη περιοχή της κεντρικής Μακεδονίας, δεν μπορεί να αναπαράγει τα ανάλογα ποσά QCLOUD που προσομοιώθηκαν στο σχήμα WSM6 (Σχήμα 4.10 και 4.11 α και γ).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Οι Kim et al., (2013) έδειξαν στη μελέτη τους ότι στο σχήμα WSM6 εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές αναλογίας μίγματος, τόσο των βροχοσταγόνων (QRAIN), όσο και του νερού των νεφών (QCLOUD), συγκριτικά με το σχήμα Goddard και συμπέραναν, ότι παρόλο που τα σχήματα της μικροφυσικής Goddard και WSM6 βασίζονται στις παραμετροποιήσεις των Lin et al., (1983) και Rutledge and Hobbs, (1984), εμφανίζουν αξιόλογες διαφορές όσον αφορά στην προσομοίωση του QCLOUD. Αυτό συμβαίνει γιατί το σχήμα Goddard τροποποιήθηκε από τους Tao et al., (2003) και Lang et al., (2007), με σκοπό να επιτευχθεί καλύτερη διαχείριση όσον αφορά στις συνθήκες κορεσμού. Οι τεχνικές αυτές παρέχονται στο μοντέλο, για να εξασφαλίσουν ότι ο υπερκορεσμός (υποκορεσμός) δεν μπορεί να υπάρξει σε ένα σημείο του πλέγματος (grid point) που είναι χωρίς νέφωση (με νέφωση).

Στο Σχήμα 4.12 προσομοιώνεται η συνολική ποσότητα των graupel σε mm, στις 21 Μαΐου 2016, υπολογισμένη ανά τρεις ώρες, από το υψηλής ανάλυσης πλέγμα για τις προσομοιώσεις των WSM6, WDM6 και Goddard, του WRF-ARW.

Αξίζει να αναφερθεί ότι στα νέφη όπου λαμβάνουν χώρα οι διεργασίες μικτής φάσης (mixed-phase), δηλαδή στα νέφη στα οποία μπορούν να συνυπάρχουν υδρομετέωρα σε υγρή (νεφοσταγονίδια και βροχοσταγόνες) και σε στερεά φάση (graupel-μαλακό, παγοκρύσταλλοι, χαλάζι), οι υπέρψυχρες σταγόνες αλληλεπιδρούν με τους παγοκρυστάλλους και σχηματίζουν πυκνότερα σωματίδια πάγου όπως είναι τα graupel. Τα graupel παίζουν σημαντικό ρόλο στην επιφανειακή βροχόπτωση, καθώς εμφανίζουν πολύ μεγάλες τερματικές ταχύτητες (Rutledge and Hobbs, 1984, Hong et al., 2004, Hong et al., 2009). Η ύπαρξη μεγάλων ποσοτήτων graupel έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση έντονων τοπικών μεγίστων της βροχόπτωσης, προκαλώντας την άμεση κατακρήμνιση, εξαιτίας του μικρού χρόνου παραμονής τους στα νέφη.



09 - 12 UTC: WSM6 - WDM6 - Goddard



12 - 15 UTC: WSM6 - WDM6 - Goddard





Σχήμα 4.12. Συνολική ποσότητα Graupel (σε mm) την 21^η Μαΐου 2016, ανά 3 ώρες α) στις 06-09 UTC, β) στις 09-12 UTC, γ) 12-15 UTC και δ) 15-18 UTC, από το υψηλής ανάλυσης πλέγμα για τις προσομοιώσεις των WSM6, WDM6 και Goddard, του WRF-ARW.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι και τα δυο σχήματα μικροφυσικής WSM6 και WDM6, βρίσκονται σε συμφωνία μεταξύ τους, σε όλα τα τρίωρα και παράγουν παρόμοιες ποσότητες παγοσωματιδίων τύπου graupel. Τη μεγαλύτερη διαφορά στη συνολική ποσότητα graupel την εμφανίζουν στο 3ωρο από τις 12 έως τις 15 UTC (Σχήμα 4.12 γ), στην οροσειρά του Ολύμπου, όπου το σχήμα WSM6 εμφανίζει μέγιστη τιμή graupel στα 59 mm, ενώ το σχήμα WDM6 στα 85mm. Στην περιοχή αυτή, το σχήμα WDM6 δημιουργεί ένα ισχυρό τοπικό μέγιστο της έντασης της βροχόπτωσης, όπως ήδη έχει αναφερθεί στη προηγούμενη παράγραφο (Σχήμα 4.5 β), και η αιτία είναι ότι σε εκείνη την περιοχή εμφανίζονται πολύ μεγάλες τιμές σχετικής υγρασίας στα 700 hPa (Σχήμα 4.1 β). Επιπλέον και τα δυο σχήματα, WSM6 και WDM6, στο 3ωρο από τις 09 έως τις 12 UTC (Σχήμα 4.12 β), εμφανίζουν στην περιοχή μελέτης αξιόλογες ποσότητες graupel, με μέγιστη τιμή στα 38 και 39 mm, αντίστοιχα.

Σε συμφωνία με όσα έχουν προαναφερθεί έρχονται τα αποτελέσματα των Lim and Hong, (2010), Wu D. et al., (2013) και Song, H. J. & Sohn, B. J. (2018), οι οποίοι έδειξαν ότι και τα δυο σχήματα μικροφυσικής WSM6 και WDM6, εμφανίζουν παρόμοιο προφίλ, όσον αφορά στις διεργασίες που συμβαίνουν στα ψυχρά νέφη (ice phase), καθώς για τα ψυχρά νέφη ακολουθούν τους ίδιους μηχανισμούς παράγωγης

κατακρημνισμάτων (Hong et al., 2004 και Hong and Lim, 2006). Επομένως δύναται να παράγουν σχεδόν ίδιες ποσότητες στερεών υδρομετεώρων (solid hydrometeor) όπως είναι τα graupel, με το σχήμα WDM6 να εμφανίζει ελαφρώς μεγαλύτερες ποσότητες.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Σύμφωνα με τον Dudhia, (1989) οι μικροφυσικές διεργασίες που ευθύνονται για τη δημιουργία και για το μετασχηματισμό των παγοσωματιδίων (τύπου graupel) μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά τη βροχόπτωση και την έντασή της, καθώς επηρεάζοντας την παραγωγή των υδρομετεώρων επηρεάζεται και η δυναμική των καταιγίδων.

Από την άλλη μεριά, το σχήμα Goddard εμφανίζει πιο σημαντικές διαφορές με το σχήμα WSM6, με το πρώτο να εμφανίζει μικρότερες τιμές συνολικής ποσότητας graupel στα δυο πρώτα 3ωρα των προσομοιώσεων (Σχήμα 4.12 α και β). Ενώ στο 3ωρο από τις 12-15 UTC το σχήμα Goddard μπορεί να μην εμφανίζει έντονα μέγιστα ποσοτήτων graupel, όπως το σχήμα WSM6, αλλά αθροιστικά έχει δώσει, στη μεγαλύτερη έκταση του domain, ποσότητες graupel που ξεπερνούν τα 30 mm (Σχήμα 4.12 γ). Επομένως προσομοιώνει μια πιο διευρυμένη περιογή υψηλών ποσοτήτων graupel. Σημαντική διαφορά στη συνολική ποσότητα graupel που προσομοιώνουν τα δυο προαναφερθέντα σχήματα παρατηρείται στο τελευταίο 3ωρο, από τις 15 έως τις 18 UTC (Σχήμα 4.12 δ), με το σχήμα Goddard να δίνει συνολική ποσότητα graupel στα 20mm, ενώ το σχήμα WSM6 εμφανίζει αμελητέες ποσότητες που ανέρχονται στα 2,1 mm. Πιθανόν η εμφάνιση αυτών των σημαντικών διαφορών στην αθροιστική ποσότητα των graupel, μεταξύ των σχημάτων WSM6 και Goddard, να οφείλεται στη θέση που εντοπίζεται το βαρομετρικού χαμηλό στα 500 και στα 850 hPa (Σχήμα 4.2 β, γ και Σχήμα 4.3 β, γ). Με το σχήμα Goddard αυτό παρατηρείται πιο νότια από τη θέση του βαρομετρικού χαμηλού που προσομοιώνει το σχήμα WSM6, ανατολικά της Θεσσαλίας, πάνω από το Αιγαίο πέλαγος. Επομένως με το πέρασμά του πάνω από το Αιγαίο, ενισχύεται και εμπλουτίζεται με μεγάλες ποσότητες υδρατμών που προκαλούν έντονα φαινόμενα.

Τα αποτελέσματα διάφορων ερευνών που πραγματοποιήθηκαν όσον αφορά στην προσομοίωση της συνολικής ποσότητας graupel, (Tao et al. 2009, Wu D. et al., 2013; Song, H. J. & Sohn, B. J. 2018), έδειξαν ότι τα δυο σχήματα μικροφυσικής WSM6 και Goddard, εμφανίζουν κάποιες σημαντικές διαφορές στο προφίλ τους, με το Goddard να παράγει μεγαλύτερες ποσότητες στερεών υδρομετεώρων (solid hydrometeor), όπως είναι τα graupel σε σχέση με το WSM6 σχήμα.



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι παραμετροποιήσεις των φυσικών διεργασιών που διέπουν τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες στη διαμόρφωση της αριθμητικής πρόγνωσης του καιρού, επομένως η επιλογή του καταλληλότερου και πιο αντιπροσωπευτικού σχήματος είναι πάρα πολύ σημαντική. Η κατανόηση της συμπεριφοράς τους, ιδιαίτερα στην προσομοίωση των έντονων καιρικών φαινομένων, μπορεί να βοηθήσει, όχι μόνο στην εύρεση των καταλληλότερων επιλογών σχημάτων, αλλά κυρίως στη βελτιστοποίηση τους.

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία έχει ως κύριο και αντικειμενικό σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς του μοντέλου και της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στις μικροφυσικές διεργασίες των τριών, τελικώς επιλεγέντων διαφορετικών σχημάτων, κατά την προσομοίωση ενός έντονου επεισοδίου ισχυρής βροχόπτωσης. Για τις αριθμητικές προσομοιώσεις του φαινομένου χρησιμοποιήθηκε ένα σύγχρονο αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού μέσης κλίμακας, το μοντέλο Weather Research and Forecasting (WRF-ARW έκδοση 3.5.1), στο οποίο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες και στόχους, μέσα από ένα πλήθος σχημάτων παραμετροποιήσεων των φυσικών διεργασιών. Το επεισόδιο της βροχόπτωσης που μελετάται, σημειώθηκε στις 21 Μαΐου του 2016, στην ευρύτερη περιοχή των Νομών Ημαθίας και Πέλλας, στη Βόρεια Ελλάδα.

Για να μελετηθεί η επίδραση των προσεγγιστικών σχημάτων της μικροφυσικής των νεφών σε διάφορες παραμέτρους και για να διαπιστωθεί ποιο από τα τρία σχήματα της μικροφυσικής προσομοιώνει καλύτερα το ισχυρό επεισόδιο της βροχόπτωσης, πραγματοποιήθηκαν τρεις προσομοιώσεις με τρία διαφορετικά σχήματα. Αρχικά με το WSM6 – WRF Single moment 6-Class microphysics scheme που θεωρείται ως προσομοίωση αναφοράς (control experiment), ενώ για τις προσομοιώσεις ευαισθησίας (sensitivity experiments) χρησιμοποιήθηκαν δυο άλλα σχήματα: το WDM6 – WRF Double moment 6-Class microphysics scheme και το Goddard Single moment 6-Class microphysics scheme. Το αίτιο δημιουργίας του έντονου επεισοδίου της βροχόπτωσης οφείλεται στην παρουσία ενός κλειστού βαρομετρικού χαμηλού στα 500 hPa. Η θέση του κλειστού βαρομετρικού χαμηλού, όπως αυτή προσομοιώθηκε στα πειράματα ευαισθησίας, έπαιξε καθοριστικό ρόλο στον τρόπο που τα τρία σχήματα μικροφυσικής αναπαριστούν τις διάφορες μετεωρολογικές παραμέτρους, καθώς και στην καλύτερη κατανόηση των διαφορών που εμφανίζουν αυτά. Έπειτα από σύγκριση των χαρτών επιφανείας, των αντίστοιχων χαρτών του γεωδυναμικού ύψους στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa και 850 hPa στα πειράματα ευαισθησίας, παρατηρείται ότι το βαρομετρικό χαμηλό, που πέρασε από την Ελλάδα, έχει κλίση προς τα δυτικά καθ' ύψος και για τα τρία σχήματα της μικροφυσικής των νεφών (WSM6, WDM6 και Goddard). Επομένως, ήταν σε φάση ανάπτυξης και ενίσχυσης, με αποτέλεσμα στην περιοχή ενδιαφέροντος να υπάρχουν έντονες ανοδικές κινήσεις αερίων μαζών και να ευνοείται η ανάπτυξη καταιγίδων.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων, όσον αφορά τις παραμέτρους που προσομοιώθηκαν (συνολική ημερήσια βροχόπτωση, ανακλαστικότητα, αναλογία μίγματος του νερού των νεφών (QCLOUD) και συνολική ποσότητα graupel), προέκυψε ότι οι μεγαλύτερες διαφορές ως προς το control πείραμα, εντοπίζονται στις προσομοιώσεις που έγιναν με το σχήμα Goddard.

Η θέση του κλειστού συστήματος των γεωδυναμικών υψών στο επίπεδο των 500 hPa και των 850hPa, παρατηρήθηκε πιο νότια από αυτό που προσομοιώνουν τα άλλα δυο σχήματα (WSM6 και WDM6), ανατολικά της Θεσσαλίας, και πάνω από την υδάτινη επιφάνεια του Αιγαίου Πελάγους. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, το βαρομετρικό χαμηλό, με το πέρασμά του από το Αιγαίο, να ενισχύεται και να εμπλουτίζεται με μεγάλες ποσότητες υδρατμών. Αυτός πιθανότατα να είναι και ο λόγος που το Goddard προσομοιώνει μια πιο διευρυμένη περιοχή υψηλών ποσών βροχής, σε σχέση με το control και αθροιστικά έχει δώσει στη μεγαλύτερη έκταση του domain, ύψη βροχής που ξεπερνούν τα 35mm. Επίσης, το Goddard προσομοιώνει με διαφορετικό τρόπο και την ανακλαστικότητα, συγκριτικά με το WSM6, εμφανίζοντας ελάχιστα μεγαλύτερες τιμές κατά τη διάρκεια του επεισοδίου της έντονης βροχόπτωσης. Οι αυξημένες τιμές της ανακλαστικότητας οφείλονται στη μεγάλη ποσότητα των graupel που εμφανίζουν οι προσομοιώσεις του. Σε παρόμοια αποτελέσματα κατέληξαν στην έρευνά τους και οι Wu D. et al., (2013), πιστοποιώντας τα παραπάνω συμπεράσματα. Τέλος, με το Goddard εμφανίζονται μικρότερες τιμές αναλογίας μίγματος του νερού των νεφών (QCLOUD) συγκριτικά με το control, καθώς στις παραμετροποιήσεις του
Goddard έχουν προστεθεί νέες τεχνικές καλύτερης διαχείρισης συνθηκών του κορεσμού.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Αντιθέτως, οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων για τις παραμέτρους που προσομοιώθηκαν από το control και το WDM6 έδειξαν ότι τα δυο σχήματα, ως επί το πλείστον, εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά.

Η εικόνα που προσομοιώνουν το control και το WDM6 σχήμα, όσον αφορά το γεωδυναμικό ύψος στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa είναι παρόμοια, αυτή είναι και η αιτία που οι διαφορές τους στα ύψη της βροχής δεν ήταν σημαντικές. Το κλειστό σύστημα γεωδυναμικών υψών, σύμφωνα με τις προσομοιώσεις των δυο προαναφερθέντων σχημάτων, εμφανίζεται στη Βόρεια Ελλάδα πάνω από την περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας στο επίπεδο των 500 hPa. Η προσομοιώσση με το σχήμα WDM6 εμφανίζει ελάχιστα μεγαλύτερο ύψος της ημερήσιας αθροιστικής βροχόπτωσης πάνω από την περιοχή μελέτης και φαίνεται ότι υπερεκτιμά τα τοπικά μέγιστα της έντονης βροχόπτωσης σε σύγκριση με το WSM6. Οι Lim and Hong, (2010), Wu D. et al., (2013) και Song, H. J. & Sohn, B. J. (2018) έδειξαν ότι η επιλογή του σχήματος WDM6 οδηγεί σε πολύ συχνή ενεργοποίηση των ανοδικών κινήσεων και υπερεκτίμηση των τοπικών μεγίστων της έντονης βροχόπτωσης στις προσομοιώσεις συγκριτικά με το σχήμα WSM6, υποστηρίζοντας έτσι τα παραπάνω συμπεράσματα.

Επιπρόσθετα, τα δυο σχήματα της μικροφυσικής των νεφών, WSM6 και WDM6, εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά και στην ανακλαστικότητα, με κάποιες μικρές διάφορες στην έντασή της. Οι διαφορές αυτές στα δυο σχήματα οφείλονται στο γεγονός ότι το WDM6 διαχειρίζεται με διαφορετικό τρόπο τις διεργασίες της αυτόμετατροπής (autoconversion) και συσσωμάτοσης (accretion) που λαμβάνουν χώρα στα θερμά νέφη σε σχέση με το WSM6, ενώ οι υπόλοιπες μικροφυσικές διεργασίες είναι οι ίδιες με αυτές του WSM6 σχήματος. Παρόλο που για τα ψυχρά νέφη (ice phase) το σχήμα WDM6 ακλουθεί τους ίδιους μηχανισμούς παραγωγής των κατακρημνισμάτων με το σχήματα, καθώς στο σχήμα WDM6 προστίθενται και οι προγνωστικές εξισώσεις του αριθμού συγκέντρωσης (number concentration) των νεφοσταγόνων N_C και των βροχοσταγόνων N_R, οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά όλες τις διεργασίες παγοποίησης, που λαμβάνουν χώρα στα ψυχρά νέφη.

Σε όλα τα ισοβαρικά επίπεδα που έγιναν οι προσομοιώσεις της αναλογίας μίγματος του νερού των νεφών QCLOUD φαίνεται ότι το σχήμα WSM6

προσομοιώνει μεγαλύτερη έκταση υψηλών τιμών αναλογίας μίγματος από το σχήμα WDM6. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με τις αναφορές των Lim and Hong, (2010), Wu D. et al., (2013) και Song, H. J. & Sohn, B. J., (2018). Παρόλα αυτά, στην περιοχή ενδιαφέροντος, τα δυο προαναφερθέντα σχήματα εμφανίζουν παρόμοια εικόνα στις τιμές του QCLOUD, αφού και το ποσό της σχετικής υγρασίας που προσομοιώνουν τα δυο σχήματα δε διαφέρει σημαντικά, με το σχήμα WSM6 να εμφανίζει ελάχιστα μεγαλύτερες τιμές, που σε μεμονωμένες περιοχές φτάνουν και τα 0,012 kg/kg.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τέλος, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι τα δυο σχήματα μικροφυσικής WSM6 και WDM6, βρίσκονται σε συμφωνία μεταξύ τους και όσον αφορά στην προσομοίωση της αθροιστικής ποσότητας παγοσωματιδίων τύπου graupel. Τη μεγαλύτερη διαφορά στη συνολική ποσότητα graupel την εμφανίζουν στο 3ωρο από τις 12 έως τις 15 UTC, στην οροσειρά του Ολύμπου, όπου το σχήμα WSM6 εμφανίζει μέγιστη τιμή graupel στα 59 mm, ενώ το WDM6 στα 85mm. Στην περιοχή αυτή το WDM6 δημιουργεί ένα ισχυρό τοπικό μέγιστο της έντασης της βροχόπτωσης και η αιτία είναι η εμφάνιση υψηλών τιμών σχετικής υγρασίας στα 700 hPa, όπως αυτή προσομοιώθηκε στα πειράματα ευαισθησίας του control και του WDM6 σχήματος.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι οι προσομοιώσεις με το σχήμα WDM6 προσεγγίζουν περισσότερο την εικόνα που δίνουν οι προσομοιώσεις του control πειράματος, συγκριτικά με αυτή που εμφανίζει το σχήμα Goddard, για τις διάφορες φυσικές παραμέτρους της περίπτωσης μελέτης. Αφενός, γιατί στα ψυχρά νέφη (ice phase) το σχήμα WDM6 ακολουθεί τους ίδιους μηχανισμούς παραγωγής των κατακρημνισμάτων με το WSM6 και αφετέρου λόγο της θέσης του κλειστού βαρομετρικού συστήματος που προσομοιώθηκε στα πειράματα.

Συνοψίζοντας, έπειτα από όλα τα πειράματα ευαισθησίας που έγιναν με σκοπό να αξιολογηθεί η ικανότητα του εκάστοτε σχήματος-μοντέλου στην αναπαράσταση του υετού εν γένει, αλλά και για να ελεγχθεί η συμπεριφορά των διαφορετικών σχημάτων παραμετροποίησης της μικροφυσικής σε ένα έντονο επεισόδιο βροχόπτωσης που επιλέχθηκε, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το control και το WDM6 σχήμα, ως επί το πλείστον, εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά. Απεναντίας, το σχήμα Goddard σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, περιγράφει με διαφορετικό τρόπο τις παραμέτρους που προσομοιώθηκαν συγκριτικά με το WSM6.



Charney, J. G., Fjörtoft, R., & Neumann, J. V. 1950. Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, 2(4), 237-254.

Chen, S.-H., and W.-Y. Sun, 2002: A one-dimensional time dependent cloud model. J.Meteor. Soc. Japan, 80, 99–118.

- Cohard, J. M., & Pinty, J. P. 2000. A comprehensive two-moment warm microphysical bulk scheme. I: Description and tests. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 126(566), 1815-1842.
- Colle, B. A., C. F. Mass, and K. J. Westrick, 2000: MM5 precipitation verification over the Pacific Northwest during the 1977-1999 cool seasons. Wea. Forecasting, 15, 730–744.
- Deb, S. K., Sprivastava, T. P., and C. M., Kishtawal, 2008: The WRF model performance for the simulation of heavy precipitating events over Ahmedabad during August 2006. Journal of Earth System Science, 117, pp. 589-602.
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. J. Atmos. Sci., 46, 3077-3107.
- Dudhia, J., 1993: A nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. Mon. Wea. Rev., 121, 1493-1513.
- Dudhia, J. 2010. Microphysics options in wrf.
- Dudhia, J., S.-Y. Hong, and K.-S. Lim, 2008: A New Method for Representing Mixed phase Particle Fall Speeds in Bulk Microphysics Parameterizations. J. Meteor. Soc. Japan, 86A, 33-44
- Efstathiou, G. A., Zoumakis, N. M., Melas, D., Lolis, C. J., & Kassomenos, P. (2013). Sensitivity of WRF to boundary layer parameterizations in simulating a heavy

rainfall event using different microphysical schemes. Effect on large-scale processes. *Atmospheric research*, 132, 125-143.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Ferrier, B. S., Jin, Y., Lin, Y., Black, T., Rogers, E., & DiMego, G. (2002, August). Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta model. In *Conference on weather analysis and forecasting* (Vol. 19, pp. 280-283). AMS.
- Haltiner, G. J., and RT Williams, 1980: Numerical Prediction and Dynamic Meteorology.
- Hong, S. Y., Juang, H. M. H., & Zhao, Q. 1998. Implementation of prognostic cloud scheme for a regional spectral model. *Monthly weather review*, 126(10), 2621-2639.
- Hong, S.,-Y., Dudhia, J., and S.,-H., Chen, 2004: A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. Mon. Wea. Rev., 132, 103 – 120
- Hong, S. Y., & Lim, J. O. J. 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). J. Korean Meteor. Soc, 42(2), 129-151.
- Hong, S.,-Y., Noh, Y., and J., Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with explicit treatment of entrainment processes. Mon. Wea. Rev., 134, 2318 2341
- Hong, S.-Y., and J.-W., Lee, 2009: Assessment of the WRF model in reproducing a flash-flood heavy rainfall event over Korea. Atmos. Res. 93, 818-831.
- Hong, S.-Y., Lim, K.-S., Kim, J.-H., Lim, J.-O., Dudhia, J., 2009: Sensitivity study of cloud resolving convective simulations with WRF using two bulk microphysical parameterizations: Ice-phase microphysics versus sedimentation effects. J. Appl. Meteor. Climatol. 48, 61–76.
- Houze, R., A., 1993: Cloud Dynamics. Academic Press, pp. 575.

IPCC. 2007. Climate change 2007: The physical science basis. Agenda, 6(07), 333.

Janjić, Z. I. 1994. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*, 122(5), 927-945.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Janjic, Z. I. 1996. The Mellor-Yamada level-2.5 scheme in the NCEP Eta model. In Preprint, 11[^] AMS Conference on Numerical Weather Prediction, Norfolk, VA, 1996.
- Jankov, I., Schultz, P. J., Anderson, C. J., Koch, S. E., 2007: The impact of different physical parameterizations and their Interactions on cold season QPF in the American River Basin. J. Hydrometeor. 8, 1141-1151.
- Jankov, I., and Coauthors, 2011: An Evaluation of Five ARW-WRF Microphysics Schemes Using Synthetic GOES Imagery for an Atmospheric River Event Affecting the California Coast. J. Hydrometeor, 12, 618–633.
- Kain, J. S., Weiss, S. J., Bright, D. R., Baldwin, M. E., Levit, J. J., Carbin, G. W., & Thomas, K. W. (2008). Some practical considerations regarding horizontal resolution in the first generation of operational convection-allowing NWP. *Weather and Forecasting*, 23(5), 931-952.
- Kallos, G., S. Nickovic, A. Papadopoulos, D. Jovic, O. Kakaliagou, N. Misirlis, L. Boukas, N. Mimikou, G. Sakellaridis, J. Papageorgiou, E. Anadranistakis, and M. Manousakis, 1997, The regional weather forecasting system SKIRON: An overview, Proceedings of the International Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments, 15-17 October 1997, Athens, Greece, 109-122.
- Karacostas, T. S. 1984. The design of the Greek national hail suppression program. In *Proc. 9th Conf. on Weather Modif* (pp. 26-27).
- Karacostas, T. S. 1989. The Greek national hail suppression program: design and conduct of the experiment. In Proc. 5th WMO Sci. Conf. on Wea. Mod. And Appl. Cloud Physics (pp. 605-608).

Karacostas, T. S., Flocas, A. A., Flocas, H. A., Kakaliagou, O., & Rizou, C. (1992, May). A study of the synoptic situations over the area of Eastern Mediterranean. In *Proceedings, 1st Greek Conf. On Meteorology-Climatology-Physics of the Atmosphere* (pp. 21-23).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

1170

- Kartsios, S., Pytharoulis, I., & Dimitrakopoulos, A. P. (2014). Coupled Weather– Wildland Fire Model for fire behavior interpretation. *Proceedings of the 12th* on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics, 28-31.
- Katsafados, P., Papadopoulos, A., Mavromatidis, E., & Gikas, N. (2011). Quantitative verification statistics of WRF predictions over the Mediterranean region. *12th* annual WRF users' event, 20-24.
- Kessler, E., 1969: On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circu- lation, Meteor. Monogr., 32, Amer. Meteor. Soc., 84 pp.
- Kessler, E., 1974: Model of precipitation and vertical air currents. Tellus, 26, 519-542.
- Khairoutdinov, M., & Kogan, Y. 2000. A new cloud physics parameterization in a large-eddy simulation model of marine stratocumulus. *Monthly weather review*, *128*(1), 229-243.
- Kyo-Sun Sunny Lim and Song You Hong, 2010 : Development of an Effective Double-Moment Cloud Microphysics Scheme with Prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for Weather and Climate Models.
- Laprise, R., 1992: The Euler Equations of motion with hydrostatic pressure as an independent variable. Mon. Wea. Rev., 120, 197-207.
- Lim, K. S. S., & Hong, S. Y. 2010. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Monthly weather review*, *138*(5), 1587-1612.
- Lin, Y.-L., R. D. Farley, and H. D. Orville, 1983: Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. J. Appl. Meteor., 22, 1065–1092.

Lin, Y.-L., and B. A., Colle, 2009: The 4–5 December 2001 IMPROVE-2 event: Observed microphysics and comparisons with the Weather Research and Forecasting model. Mon. Wea. Rev., 137, 1372–1392.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Lin, Y.-L., and B. A., Colle, 2011: A new bulk microphysical scheme that includes riming intensity and temperature-dependent ice characteristics. Mon. Wea. Rev., 139, 1013–1035.
- Locatelli, J. D., & Hobbs, P. V. 1974. Fall speeds and masses of solid precipitation particles. *Journal of Geophysical Research*, 79(15), 2185-2197.
- Mandel, J., J. D. Beezley and A. K. Kochanski, 2011: Coupled atmosphere-wildland fire modeling with WRF 3.3 and SFIRE 2011. Geosci. Model Dev., 4, 591– 610, doi:10.5194/gmd-4-5912011.
- McCumber, M., Tao, W. K., Simpson, J., Penc, R., & Soong, S. T. (1991). Comparison of ice-phase microphysical parameterization schemes using numerical simulations of tropical convection. *Journal of Applied meteorology*, 30(7), 985-1004.
- Molthan, A. L., Case, J. L., Dembek, S. R., Jedlovec, G. J., & Lapenta, W. M. (2008).The Super Tuesday outbreak: Forecast sensitivities to single-moment microphysics schemes.
- Morrison, H., J. A. Curry, and V. I. Khvorostyanov, 2005: A New Double-Moment Microphysics Parameterization for Application in Cloud and Climate Models. Part I: Description. J. Atmos. Sci., 62, 1665–1677.
- Morrison, H., & Pinto, J. O. 2006. Intercomparison of bulk cloud microphysics schemes in mesoscale simulations of springtime Arctic mixed-phase stratiform clouds. *Monthly weather review*, 134(7), 1880-1900.
- Morrison,H., G. Thompson, and V. Tatarskii, 2009: Impact of Cloud Microphysics on the Development of Trailing Stratiform Precipitation in a Simulated Squall Line: Comparison of One- and Two-Moment Schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 991–1007.

Pielke, R. A, 2002: Mesoscale Meteorological Modeling, Academic Press, pp. 674
Pielke, R. A., Cotton, W. R., Walko, R. E. A., Tremback, C. J., Lyons, W. A., Grasso,
L. D., & Copeland, J. H. (1992). A comprehensive meteorological modeling

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

system—RAMS. *Meteorology and atmospheric Physics*, 49(1-4), 69-91.

- Rao, Y. R., Hatwar, H. R., Salah, A. K., & Sudhakar, Y. (2007). An experiment using the high resolution Eta and WRF models to forecast heavy precipitation over India. *Pure and Applied Geophysics*, 164(8-9), 1593-1615.
- Reisner, J., RaSmuSSen, R. M., & Bruintjes, R. T. (1998). Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 124(548), 1071-1107.
- Richardson, L. F. 1922. Weather prediction by numerical methods. *Cambridge: Cambridge University Press.*
- Rutledge, S. A., and P. V. Hobbs, 1984: The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. Part XII: A diagnostic modeling study of precipitation development in narrow cloud frontal rainbands. J. Atmos. Sci., 41, 2949–2972.
- Ryan, B. F., 1996: On the global variation of precipitating layer clouds. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 53-70.
- Segele, Z. T., Leslie, L. M., & Lamb, P. J. 2013. Weather Research and Forecasting Model simulations of extended warm-season heavy precipitation episode over the US Southern Great Plains: data assimilation and microphysics sensitivity experiments. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 65(1), 19599.
- Shi, J. J., Tao, W. K., Matsui, T., Cifelli, R., Hou, A., Lang, S., & Rutledge, S. (2010).
 WRF simulations of the 20–22 January 2007 snow events over eastern
 Canada: Comparison with in situ and satellite observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(11), 2246-2266.

Shuman, F. G. (1989). History of numerical weather prediction at the National Meteorological Center. *Weather and Forecasting*, 4(3), 286-296.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

1170

Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang and J. G. Powers, 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Technical Note 475, available at: http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw v3.pdf.

- Song, H. J., & Sohn, B. J. (2018). An evaluation of WRF microphysics schemes for simulating the warm-type heavy rain over the Korean peninsula. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 1-12.
- Stolaki S., I. Pytharoulis and Th. Karacostas, 2012: A study of fog characteristics using a coupled WRF-COBEL model over Thessaloniki Airport, Greece. Pure Appl. Geophys., 169, 961–981, DOI: 10.1007/s00024-011-0393-0.
- Tao, W-K., J. Simpson, and M. McCumber, 1989: An Ice-Water Saturation Adjustment. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 231–235.
- Tao, W. K., & Simpson, J. (1993). The Goddard cumulus ensemble model. Part I: Model description. *Terr. Atmos. Oceanic Sci*, 4(1), 35-72.
- Tao, W. K., Simpson, J., Baker, D., Braun, S., Chou, M. D., Ferrier, B., & Shie, C. L. (2003). Microphysics, radiation and surface processes in the Goddard Cumulus Ensemble (GCE) model. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 82(1), 97-137.
- Tao, W. K., Shi, J. J., Braun, S., Simpson, J., Chen, S. S., Lang, S., & Peters-Lidard,C. (2009). Studying Precipitation Processes in WRF with Goddard BulkMicrophysics in Comparison with Other Microphysical Schemes.
- Thompson, G., Rasmussen, R. M., & Manning, K. (2004). Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. *Monthly Weather Review*, 132(2), 519-542.

Thompson, G., P. R. Field, R. M. Rasmussen, and W. D. Hall, 2008: Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 5095–5115.

- Wang, W., C. Bruyère, M. Duda, J. Dudhia, D. Gill, H. C. Lin, J. Michalakes, S. Rizvi, X. Zhang, J. D. Beezley, J. L. Coen J. Mandel, H-Y. Chuang, N. Mckee, T. Slovacek and J. Wolff, 2012: ARW Version 3 Modeling System User's Guide, Mesoscale & Miscroscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, available at: http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/ARWUsersGuideV3.pdf.
- Wicker, L. J. and W. C. Skamarock, 2002: Time splitting methods for elastic models using forward time schemes, Mon. Wea. Rev., 130, 2088–209and decay within a three-dimensional supercell thunderstorm. J. Atmos. Sci., 52, 2675– 2703.
- Wu, D., Dong, X., Xi, B., Feng, Z., Kennedy, A., Mullendore, G., & Tao, W. K. (2013). Impacts of microphysical scheme on convective and stratiform characteristics in two high precipitation squall line events. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(19), 11-119.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Καρακώστας, Θ.Σ., 2000: Αξιολόγηση του Εθνικού Προγράμματος Χαλαζικής Προστασίας των Καλλιεργειών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, σελ. 128.
- Καρακώστας Θ.Σ., 2005: Σημειώσεις Φυσικής νεφών και τροποποίησης καιρού. Α.Π.Θ Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Θεσσαλονίκης Σελ 20-44.
- Καρακώστας, Θ., Α. Φλόκας, Ε.Φλόκα, Ο. Κακαλιάγκου και Χ. Ρίζου, 1992: Μελέτη των Συνοπτικών Καταστάσεων στην Περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου. 10

Πανελλήνιο Συνέδριο Μετεωρολογίας- Κλιματολογίας- Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Θεσσαλονίκη, ΕΛΛΑΔΑ, 469-477.

- Κατσαφάδος, Π., Μαυροματίδης, Η., Γκίκας, Ν., & Παπαδόπουλος, Α. (2010). Το προγνωστικό σύστημα καιρού του Χαροκοπείου πανεπιστημίου: χαρακτηριστικά και προγνωστικά προϊόντα. The weather forecasting system of Harokopio university: characteristics and forecasting products. Πανελλήνια και Διεθνή Γεωγραφικά Συνέδρια, Συλλογή Πρακτικών, 51-58.
- Μπαλαφούτης, Χ.Γ. και Π. Μαχαίρας, 1984: Γενική Κλιματολογία με στοιχεία Μετεωρολογίας. University Studio Press, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 338 σελ
- Πυθαρούλης Ι., 2014: Παρουσιάσεις στα πλαίσια του μαθήματος «Αριθμητική Πρόγνωση» του Μεταπτυχιακού κύκλου σπουδών Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος του τμήματος Γεωλογίας, ΑΠΘ
- Πυθαρούλης Ι., 2014: Παρουσιάσεις στα πλαίσια του μαθήματος «Συνοπτική Μετεωρολογία» του Μεταπτυχιακού κύκλου σπουδών Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος του τμήματος Γεωλογίας, ΑΠΘ
- Σιούτας, Μ.Β., 1999: Συμβολή στη μελέτη των χαλαζοκαταιγίδων στο χώρο της Κεντρικής Μακεδονίας. Διδακτορική διατριβή, Α.Π.Θ, 300 pp.

Διαδικτυακές Πηγές

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

http://meted.ucar.edu/ http://meted.ucar.edu/nwp/pcu2/etapcp1.htm http://meteo.geo.auth.gr http://www.ncl.ucar.edu/ http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/ www.metoffice.gov.uk