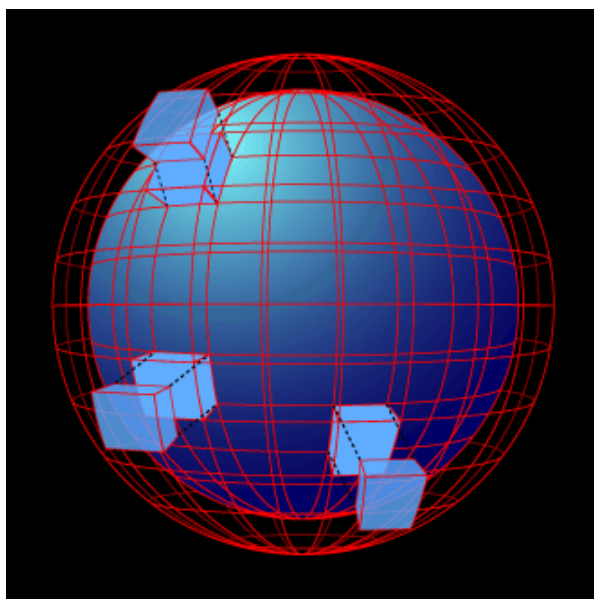


ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ – ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

**«ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΚΑΙΡΟΥ WRF»**



ΠΑΡΑΝΟΣ – ΛΙΟΛΙΟΣ ΧΡΥΣΟΣΤΟΜΟΣ

Θεσσαλονίκη, Φεβρουάριος 2010

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ – ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

**«ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ
ΚΑΙΡΟΥ WRF (Weather Research and Forecasting Model)»**

ΠΑΡΑΝΟΣ – ΛΙΟΛΙΟΣ ΧΡΥΣΟΣΤΟΜΟΣ

A.E.M. : 4043

Επιβλέπων Καθηγητής: Καρακώστας Θεόδωρος
Συνεπιβλέπων Καθηγητής: Πυθαρούλης Ιωάννης

Θεσσαλονίκη, Φεβρουάριος 2010

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Η διεκπεραίωσή της πραγματοποιήθηκε στον τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας κατά το ακαδημαϊκό έτος 2009-2010 με επιβλέπων καθηγητή τον κ. Καρακώστα Θεόδωρο, Καθηγητή του εργαστηρίου Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, συνεπιβλέπων τον κ Πυθαρούλη Ιωάννη, Λέκτορα καθηγητή του εργαστηρίου Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας. Στην ερευνητική αυτή προσπάθεια η οποία ξεκίνησε τον Φεβρουάριο του 2009, πολλοί ήταν οι άνθρωποι που συνέβαλλαν σε σημαντικό βαθμό στην ολοκλήρωσή της, ο καθένας με το δικό του τρόπο.

Συγκεκριμένα θα ήθελα να ευχαριστήσω:

- Τον κ. Καρακώστα Θεόδωρο, Καθηγητή του εργαστηρίου Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, για θέματα που αφορούσαν στην εξέλιξη της εργασίας όπως η άψογη συνεργασία, η παροχή βοήθειας και καθοδήγησης καθ' όλη τη διάρκεια και για την ένδειξη εμπιστοσύνης στο πρόσωπό μου.
- Τον κ Πυθαρούλη Ιωάννη, Λέκτορα καθηγητή του εργαστηρίου Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας για την παροχή βιβλιογραφικών δεδομένων, απαραίτητων για την ομαλή διεκπεραίωση της παρούσης εργασίας.
- Την οικογένειά μου για την ηθική στήριξη και την υπομονή που επέδειξαν στο πρόσωπό μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
Περίληψη	6
1. Εισαγωγή	7
1.1. Ιστορική αναδρομή	7
1.2. Μοντέλα πρόγνωσης καιρού	10
1.2.1 Τι είναι τα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού	10
1.2.2 Οι βασικές εξισώσεις	11
1.2.3 Φυσικές διεργασίες	14
1.2.4 Παραμετροποιήσεις φυσικών διεργασιών	14
1.2.5 Το σύστημα στοχαστικής πρόγνωσης.....	18
1.3 Τρόπος λειτουργίας των μοντέλων πρόγνωσης καιρού.....	20
1.4 Κατηγορίες μοντέλων πρόγνωσης καιρού	22
1.4.1 Μοντέλα πεπερασμένων διαφορών και φασματικά μοντέλα	22
1.4.2 Κατηγορίες σύμφωνα με το πεδίο χρήσης των μοντέλων	27
2. Το προγνωστικό μοντέλο WRF	29
2.1 Σύντομη περιγραφή.....	29
2.1.1 Το αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης WRF-ARW	30
2.1.2 Το αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης WRF-NMM.....	32
2.2 Το σύστημα προεπεξεργασίας WPS	33
2.3 Το λογισμικό του WRF.....	34
2.4 Αντικειμενική ανάλυση του WRF	36
2.5 Εργαλεία απεικόνισης του WRF.....	38
2.6 Τοποθέτηση αρχικών στο WRF	38
2.7 Σύστημα απόκλισης	40
2.8 Φυσικομαθηματική δομή του WRF.....	41
2.8.1 Μικροφυσική	42
2.8.2 Ακτινοβολία Μεγάλου Κύματος (ra_lw_physics).....	42
2.8.3 Ακτινοβολία μικρού κύματος (ra_sw_physics)	43
2.8.4 Επιφανειακό στρώμα (sf_sfclay_physics)	43
2.8.5 Επιφάνεια του εδάφους (sf_surface_physics).....	43
2.8.6 Πλανητικό οριακό στρώμα (bl_pbl_physics)	44
2.8.7 Παραμετροποίηση Σωρειτών (cu_physics)	44
2.9 Επιλογές διάχυσης και απόσβεσης	45

2.9.1 Επιλογές διάχυσης	45
2.9.2 Επιλογές απόσβεσης	46
2.10 Επιλογές μετατόπισης.....	46
2.11 Άλλες δυναμικές επιλογές	47
2.12 Επιλογές συνθηκών των πλευρικών ορίων	47
3. Εφαρμογές του WRF	48
3.1 Πεδία εφαρμογών	48
3.1.1 Πρόγνωση τυφώνων	48
3.1.2 Πρόγνωση διασποράς ρύπων	52
3.1.3 Εποχική πρόγνωση υετού	53
3.1.4 Πλανητικό WRF	55
3.2 Σύγκριση WRF-ARW με το WRF-NMM	55
4. Συμπεράσματα.....	57
Βιβλιογραφία	58

Περίληψη

Στόχος της εργασίας μας είναι η προσπάθεια συνοπτικής παρουσίασης του αριθμητικού μοντέλου πρόγνωσης καιρού WRF (Weather Research and Forecasting Model).

Αρχικά γίνεται μία εισαγωγή στην ιστορία της μετεωρολογίας και την εξέλιξή της μέχρι σήμερα. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα είδη των αριθμητικών μοντέλων πρόγνωσης και ο τρόπος με τον οποίο λειτουργούν. Ακολουθεί η ανάλυση του μοντέλου που εξετάστηκε, όπου γίνεται αναφορά για την εσωτερική του δομή, την φυσικομαθηματική του λειτουργία καθώς και το λογισμικό που απαιτείται για την λειτουργία του. Τέλος, αναλύονται κάποιοι από τους τομείς στους οποίους εφαρμόζεται το συγκεκριμένο αριθμητικό μοντέλο και παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες περιπτώσεις εφαρμογής του.

Η εργασία μας κλείνει με την εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων σχετικά με την παρουσία του WRF στον κλάδο της πρόγνωσης και έρευνας του καιρού και κατά πόσο ανταγωνιστικό μπορεί να είναι αλλά και να αναπτυχθεί περαιτέρω.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Από αρχαιοτάτων χρόνων φαίνεται να απασχολούσε ο καιρός τον άνθρωπο και όπως μαθαίνουμε από τα συγγράμματα του Αριστοτέλη, του Ιπάρχου, του Ιπποκράτη, του Θεόφραστου κ.ά. οι πρώτοι που θέλησαν να ερμηνεύσουν τα μετεωρολογικά φαινόμενα και να προχωρήσουν στην πρόβλεψη αυτών, ήταν οι αρχαίοι Έλληνες. Οι αρχαίοι Έλληνες φιλόσοφοι, οι οποίοι στην έννοια της φιλοσοφίας περιλάμβαναν το σύνολο των ανθρώπινων γνώσεων, προχώρησαν σε μια λεπτομερέστερη θεώρηση των ατμοσφαιρικών-μετεωρολογικών φαινομένων. Μελετώντας αυτά χωρίς θρησκευτικές προκαταλήψεις και μαγανείες, άρχισαν με την πάροδο του χρόνου να αποδίδουν τη γένεση αυτών σε φυσικά αίτια, ερχόμενοι έτσι σε απευθείας αντίθεση με τη λαϊκή και θρησκευτική παράδοση. Ο κόσμος κατηγόρησε τους φιλόσοφους των οποίων οι γνώμες ήταν αντίθετες προς τις θρησκευτικές του πεποιθήσεις. Μια τέτοια περίπτωση σημειώνεται την εποχή του Περικλέους, όπου είχε ψηφισθεί νόμος με τον οποίον, όλοι όσοι δίδασκαν θέματα που αφορούσαν την Μετεωρολογία μηνύονταν και καταδικάζονταν αφού συνεπάγονταν ότι δεν πίστευαν στους θεούς. Με βάση τον νόμο αυτό, δικάστηκε και οδηγήθηκε σε εξορία ο Αναξαγόρας γιατί υποστήριζε ότι τα μετέωρα δεν ήταν θεϊκά αλλά φυσικά φαινόμενα.

Από τον 5^ο π.Χ. αιώνα άρχισε να φαίνεται μία σοβαρή τάση για εκτέλεση συστηματικών μετεωρολογικών παρατηρήσεων, οι οποίες αποτέλεσαν ασφαλείς πληροφορίες για εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις κατά την εποχή εκείνη κλιματικές συνθήκες στην Ελλάδα. Τις παρατηρήσεις αυτές οι Αρχαίοι φιλόσοφοι τις εκτελούσαν, σύμφωνα με την μαρτυρία του Θεόφραστου και άλλων, σε διάφορες περιοχές της χώρας και σε ψηλά κατά προτίμηση σημεία έξω από τις πόλεις, τα καλούμενα παρατηρητήρια. Τα κυριότερα μετεωρολογικά παρατηρητήρια ήσαν αυτό του όρους Λεπέτυμνον στην Μήθυμνα και αυτό του όρους Ίδη στην Τρωάδα, για τα οποία αναφέρει σχετικά ο Θεόφραστος.

Το διάστημα που μεσολάβησε από τον 5^ο π.Χ. αιώνα μέχρι τα τέλη του 16^{ου} αιώνα μ.Χ. δεν σημειώθηκε σχεδόν καμία εξέλιξη στα πεδία της μετεωρολογίας και της κλιματολογίας. Η περίοδος αυτή ονομάστηκε «Η Περίοδος των Εικασιών» όπου

κυριαρχεί η μετεωρολογική αυθεντία εκείνης της εποχής, ο φιλόσοφος Αριστοτέλης με τα «Μετεωρολογικά» του.

Στα τέλη του 16^{ου} αιώνα ο Γαλιλαίος εφηύρε το θερμόμετρο ενώ το 1643 ο Τορρικέλι το βαρόμετρο. Η εφεύρεση των δύο αυτών οργάνων αποτέλεσε ορόσημο στην ιστορία της μετεωρολογίας και σηματοδότησε την αρχή της περιόδου που χαρακτηρίστηκε ως η «Αρχή της Επιστημονικής Μετεωρολογίας» και διήρκησε περίπου ως το 1850. Ακολούθησε και η εφεύρεση άλλων οργάνων όπως των βροχόμετρων, των υγρόμετρων και των ανεμόμετρων. Επίσης οι καιρικές παρατηρήσεις που κατέγραφαν οι καπετάνιοι των ιστιοφόρων πλοίων που άρχισαν πλέον μεγαλύτερα ταξίδια, έδωσαν ώθηση για διάφορες έρευνες τον 17ο, 18ο και 19ο αιώνα.

Το 1820 ο Γερμανός μετεωρολόγος Brandes κατασκεύασε τους πρώτους συνοπτικούς χάρτες καιρού όπου γίνεται φανερή η ύπαρξη και η φύση των συστημάτων πίεσης (βαρομετρικά χαμηλά, βαρομετρικά υψηλά). Μπορούμε να πούμε ότι την εποχή εκείνη γεννήθηκε η συνοπτική μετεωρολογία ενώ η περαιτέρω ανάπτυξή της έγινε χάρη σ' ένα τυχαίο γεγονός που αφορούσε μια στρατιωτική επιχείρηση.

Η πρώτη Μετεωρολογική Υπηρεσία δημιουργήθηκε το 1854 στο Αστεροσκοπείο Παρισίων, που περιλάμβανε και ειδικό τμήμα προγνώσεων. Η πρόγνωση βασίζεται στις παρατηρήσεις που γίνονται στη Γαλλία και σε άλλες χώρες της Ευρώπης και αποστέλλονται μέσω του τηλέγραφου, του οποίου η εφεύρεση (1848) πρόσφερε μεγάλες υπηρεσίες στη μετεωρολογία.

Σταδιακά αρχίζουν να ιδρύονται μετεωρολογικές υπηρεσίες και σε άλλες χώρες με πρώτες τις ΗΠΑ, την Αγγλία και την Ολλανδία. Από την πρώτη στιγμή φάνηκε ότι είναι απαραίτητη η διεθνής συνεργασία για τη σωστή πρόβλεψη του καιρού με αποτέλεσμα να συσταθεί το 1878 ο Διεθνής Μετεωρολογικός Οργανισμός, από τον οποίο δημιουργήθηκε το 1950 ο Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός (WMO). Στην Ελλάδα από το 1839 αρχίζουν να γίνονται οι πρώτες μετεωρολογικές παρατηρήσεις από το Αστεροσκοπείο Αθηνών ενώ από το 1890 αρχίζει να λειτουργεί ένα μικρό δίκτυο από 7 μετεωρολογικούς σταθμούς σε όλη τη χώρα. Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα στο πεδίο των θεωρητικών ερευνών σημαντική είναι η διατύπωση της θεωρίας της γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας από τον V.Bjerknes που αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της θεωρητικής μετεωρολογίας. Στην ανάπτυξη της μετεωρολογίας κατά τις αρχές του 20ου αιώνα συνέβαλε η εφεύρεση του ασύρματου

και η πρόοδος της φυσικής, των μαθηματικών και της χημείας. Ιδιαίτερα συνέβαλε ο 1^{ος} Παγκόσμιος Πόλεμος, κατά τη διάρκεια του οποίου η χρησιμοποίηση του αεροπλάνου και των ασφυξιογόνων αερίων, ανάγκασε τους εμπόλεμους να αναδιοργανώσουν τις Μετεωρολογικές Υπηρεσίες και να πυκνώσουν τις παρατηρήσεις που αφορούσαν, κυρίως, τους ανώτερους ανέμους. Την περίοδο του Μεσοπολέμου αναπτύσσονται θεωρίες για το σχηματισμό των αέριων μαζών, το σχηματισμό των νεφών, τα προβλήματα της γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας, τη θερμοδυναμική της ατμόσφαιρας και των κινηματικών ιδιοτήτων των μετώπων και των υφέσεων. Ένα ακόμα σημαντικό γεγονός είναι η χρήση της ραδιοβολίδας που επέτρεψε να μελετήσουμε την ατμόσφαιρα καθ' ύψος. Αυτός είναι ένας από τους σημαντικότερους σταθμούς στην εξέλιξη της Συνοπτικής και της Θεωρητικής Μετεωρολογίας.

Το 1931 ιδρύεται και στην Ελλάδα η Μετεωρολογική Υπηρεσία η οποία υπάγεται στο τότε Υπουργείο Αεροπορίας και αρχίζει να λειτουργεί με ένα πιο οργανωμένο τρόπο. Ο 2ος Παγκόσμιος Πόλεμος υπήρξε αναμφίβολα μια περίοδος γόνιμων εξελίξεων και μεγάλης προόδου για τη Μετεωρολογία. Οι επιχειρήσεις στην ξηρά, στη θάλασσα και στον αέρα ήταν κατά τη διάρκεια του πολέμου αυτού πολύ μεγαλύτερες από ότι κατά τον 1^ο Παγκόσμιο Πόλεμο. Μετά το 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο στην Ελλάδα η Μετεωρολογική Υπηρεσία ονομάζεται πια Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, και υπάγεται από τότε μέχρι και σήμερα στο Υπουργείο Εθνικής Άμυνας.

Μετά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο ετέθησαν σε τροχιά γύρω από τη γη οι πρώτοι τεχνητοί δορυφόροι για την έρευνα της γήινης ατμόσφαιρας και της περιοχής κοντά στα όρια του κοσμικού διαστήματος. Γενικώς, η συμβολή των τεχνητών δορυφόρων στη Μετεωρολογία ήταν τόσο επιτυχής, ώστε κατασκευάστηκαν και ειδικοί μετεωρολογικοί δορυφόροι τόσο από τους Αμερικάνους όσο και από τους Ρώσους. Ο πρώτος από αυτούς ο TIROS 1 ετέθη σε τροχιά γύρω από τη γη την 1^η Απριλίου 1960 και ακολούθησε ο Ρωσικός COSMOS. Στις αρχές του 21^{ου} αιώνα οι μετεωρολογικοί δορυφόροι που είναι σε τροχιά και καλύπτουν την Ευρώπη είναι οι Αμερικανικοί NOAA (σειρά TIROS), οι Ευρωπαϊκοί METEOSAT IV και οι Ρωσικοί METEOR I και II. Σημαντική ήταν και είναι η συμβολή των μετεωρολογικών ραντάρ.

Το τελευταίο επίτευγμα από τα τέλη της δεκαετίας του 1960 μέχρι και σήμερα, είναι η χρησιμοποίηση των ηλεκτρονικών υπολογιστών στην αριθμητική πρόγνωση του καιρού με τη χρήση των αριθμητικών μοντέλων που μπορούν να προσομοιάζουν τις καιρικές διεργασίες που συντελούνται στην ατμόσφαιρα.

Το μέλλον της Μετεωρολογίας προβλέπεται εξαιρετικά ευοίωνο. Το θεωρητικό υπόβαθρο πάνω στην φυσική και τα μαθηματικά και η σπουδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών θα συντελέσουν στην πρόοδο της μετεωρολογίας και στη λύση ενός μεγάλου αριθμού δύσκολων προβλημάτων.

1.2 Μοντέλα πρόγνωσης καιρού

1.2.1 Τι είναι τα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού

Τα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού, είναι συστήματα 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.

Ο V. Bjerknes το 1904 ήταν ο πρώτος που αναγνώρισε ότι η αριθμητική πρόγνωση καιρού είναι εφικτή. Πρότεινε ότι η πρόγνωση καιρού θα μπορούσε να θεωρηθεί σαν ένα μαθηματικό πρόβλημα αρχικών συνθηκών, αφού συγκεκριμένες εξισώσεις εξηγούν τη μεταβολή των μετεωρολογικών μεταβλητών με το χρόνο.

Επομένως αν γνωρίζουμε την αρχική κατάσταση της ατμόσφαιρας, μπορούμε να επιλύσουμε τις εξισώσεις και να πάρουμε τις τιμές των μεταβλητών στο μέλλον (δηλαδή να κάνουμε πρόγνωση).

Αν είναι αληθινό, όπως κάθε επιστήμονας πιστεύει, ότι οι επόμενες ατμοσφαιρικές καταστάσεις αναπτύσσονται από τις προηγούμενες σύμφωνα με τους φυσικούς νόμους, τότε είναι προφανές ότι οι αναγκαίες και ικανές συνθήκες για τη λογική επίλυση των προβλημάτων της πρόγνωσης καιρού είναι οι ακόλουθες:

1. Η επαρκώς ακριβής γνώση της αρχικής κατάστασης της ατμόσφαιρας.

Την γνώση της αρχικής κατάστασης της ατμόσφαιρας μας την παρέχουν κάποια ειδικά όργανα μέτρησης που είναι τοποθετημένα σε αρκετά σημεία στην επιφάνεια της Γης. Πληροφορίες για την αρχική κατάσταση λαμβάνουμε επίσης από κατάλληλα όργανα που φέρουν πλοία, αεροπλάνα από ραδιοβολίσσεις αλλά και από τους δορυφόρους.

2. Η επαρκώς ακριβής γνώση των νόμων σύμφωνα με τους οποίους μία κατάσταση της ατμόσφαιρας αναπτύσσεται από μία άλλη.

Την εξέλιξη των καταστάσεων της ατμόσφαιρας την αποδίδουμε στα μοντέλα με κάποιες αριθμητικές εξισώσεις που καλούνται βασικές εξισώσεις και θα τις εξετάσουμε παρακάτω.

1.2.2 Οι βασικές εξισώσεις

Για την μελέτη των εξισώσεων που διέπουν την ατμόσφαιρα, αρχικά θα επικεντρωθούμε στις επτά μεταβλητές της ατμόσφαιρας και τις επτά εξισώσεις που εξηγούν την συμπεριφορά τους. Οι επτά μεταβλητές είναι: οι τρεις συνιστώσες της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου (u , v , w), η πυκνότητα του αέρα (ρ), η θερμοκρασία (T), η πίεση (p) και η υγρασία (q). Μαζί με τις κατάλληλες οριακές συνθήκες (π.χ. το επιφανειακό στρώμα της Γης), αυτές οι επτά εξισώσεις παρέχουν την μαθηματική επεξήγηση της ατμόσφαιρας.

Παρακάτω βλέπουμε την απλοποιημένη μορφή των πραγματικών εξισώσεων που χρησιμοποιούνται στα αριθμητικά μοντέλα. Οι εξισώσεις είναι γραμμένες σε Eulerian μορφή, 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. Όροι όπως η καμπυλότητα της γης δεν περιλαμβάνονται εδώ για λόγους απλότητας και φυσικές διεργασίες όπως η τριβή και η αδιαβατική θέρμανση/ψύξη αναπαριστώνται μόνο από έναν όρο.

Οι εξισώσεις είναι γραμμένες σε ισοβαρικές συντεταγμένες (x - y - p) και περιλαμβάνουν όλες τις βασικές φυσικές και δυναμικές διεργασίες που είναι απαραίτητες στα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού.

Εξαιτίας της χρήσης ισοβαρικών συντεταγμένων (στο παράδειγμα), η δύναμη της βαροβαθμίδας (pressure gradient force - PGF) δίνεται σαν βαθμίδα του ύψους (z), και η «οριζόντια» ροή θεωρείται πάνω στις ισοβαρικές επιφάνειες. Όμως τα περισσότερα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού χρησιμοποιούν άλλες κατακόρυφες συντεταγμένες για να βελτιώσουν την ακρίβεια και να απλοποιήσουν τους υπολογισμούς.

$$\begin{aligned} \text{➤ } \mathbf{1a.} \quad \frac{\partial u}{\partial t} &= -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - \omega \frac{\partial u}{\partial p} + f v - g \frac{\partial z}{\partial x} + F x \\ \mathbf{1b.} \quad \frac{\partial v}{\partial t} &= -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - \omega \frac{\partial v}{\partial p} - f u - g \frac{\partial z}{\partial y} + F y \end{aligned}$$

Οι εξισώσεις 1a και 1b αναφέρονται στον άνεμο και τη μεταβολή των συνιστωσών U και V ως προς το χρόνο.

Η συνιστώσα U καθορίζει τις χρονικές μεταβολές του ανέμου που προκαλούνται από:

- Οριζόντια μεταφορά της συνιστώσας U
- Κατακόρυφη μεταφορά της συνιστώσας U
- Αποκλίσεις της V συνιστώσας του ανέμου από τη γεωστροφική ισορροπία.
- Άλλες φυσικές διεργασίες, όπως η τριβή.

Η συνιστώσα V καθορίζει τις χρονικές μεταβολές του ανέμου που προκαλούνται από:

- Οριζόντια μεταφορά της συνιστώσας V
- Κατακόρυφη μεταφορά της συνιστώσας V
- Αποκλίσεις της U συνιστώσας του ανέμου από τη γεωστροφική ισορροπία.
- Άλλες φυσικές διεργασίες, όπως η τριβή.

$$\text{➤} \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0$$

Η παραπάνω εξίσωση αναφέρεται στην εξίσωση της συνέχειας που εξηγεί την διατήρηση της μάζας.

$$\text{➤} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} - \omega \left(\frac{\partial T}{\partial p} - \frac{RT}{c_p p} \right) + \frac{H}{c_p}$$

Η παραπάνω εξίσωση αφορά την μεταβολή της θερμοκρασίας με το χρόνο.

Οι μεταβολές της θερμοκρασίας T με το χρόνο σχετίζονται με:

- Την οριζόντια μεταφορά από τις δύο οριζόντιες συνιστώσες του ανέμου.
- Τη διαφορά ανάμεσα στην κατακόρυφη μεταφορά της θερμοκρασίας και την αδιαβατική θέρμανση/ψύξη λόγω της κατακόρυφης κίνησης.
- Τα αποτελέσματα άλλων διαδικασιών, όπως ακτινοβολία, ανάμιξη, συμπύκνωση κλπ.

Η εξίσωση της θερμοκρασίας εξαρτάται και από την υγρασία εξαιτίας του ρόλου της

α) στο ποσό της θερμότητας που εκλύεται/απαιτείται λόγω συμπύκνωσης/εξάτμισης, και

β) στην ενεργοποίηση της ανωμεταφοράς (convection) η οποία επίσης συνεισφέρει στη θέρμανση/ψύξη λόγω συμπύκνωσης/εξάτμισης.

$$\triangleright \frac{\partial q}{\partial t} = -u \frac{\partial q}{\partial x} - v \frac{\partial q}{\partial y} - \omega \frac{\partial q}{\partial p} + E - P$$

Η παραπάνω εξίσωση αφορά την μεταβολή της υγρασίας με το χρόνο.

Οι μεταβολές της υγρασίας q με το χρόνο σχετίζονται με:

- Την οριζόντια μεταφορά της υγρασίας.
- Την κατακόρυφη μεταφορά της υγρασίας.
- Την εξάτμιση του νερού ή εξάχνωση των παγοκρυστάλλων.
- Τη συμπύκνωση.

$$\triangleright \frac{\partial z}{\partial p} = -\frac{RT}{pg}$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι η υδροστατική εξίσωση.

Η υδροστατική εξίσωση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των γεωδυναμικών υψών, τα οποία είναι αναγκαία στις προγνωστικές εξισώσεις του ανέμου.

Αυτή η εξίσωση συνδέει τη μέση θερμοκρασία ενός στρώματος της ατμόσφαιρας του μοντέλου με τη διαφορά των υψών των δύο ισοβαρικών επιφανειών που περικλείουν αυτό το στρώμα.

Οι θερμοκρασίες που έχουν προβλεφθεί από την προγνωστική εξίσωση της θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται εδώ για τον υπολογισμό των υψών, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται από τις προγνωστικές εξισώσεις του ανέμου.

Στην πραγματικότητα, οι εξισώσεις αυτές παρέχουν μια προσεγγιστική επεξήγηση της ατμόσφαιρας καθώς εισάγουμε ποικίλες απλοποιήσεις για την διευκόλυνση των μετεωρολόγων. Για παράδειγμα, η ακτινοβολία και η ανωμεταφορά εφαρμόζονται άμεσα μόνο στις εξισώσεις της θερμοκρασίας και της υγρασίας και όχι στις προγνωστικές εξισώσεις του ανέμου. Όμως, οι μεταβολές της θερμοκρασίας θα προκαλέσουν μεταβολές στη δύναμη της βαροβαθμίδας, η οποία με τη σειρά της θα επηρεάσει τον άνεμο.

Σε ιδιαίτερες εφαρμογές είναι δυνατόν να γίνουν επιπλέον απλοποιήσεις κι έτσι να απαιτούνται απλούστερα μοντέλα.

1.2.3 Φυσικές διεργασίες

Όσον αφορά κάποιες φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα είτε αναπαριστούνται στα σημεία πλέγματος είτε αν δεν μπορούν να αναλυθούν από το μοντέλο λόγω ανεπαρκούς χωρικής ανάλυσης, λαμβάνονται υπόψη μέσω παραμετροποιήσεων.

Τέτοιες παραμετροποιήσεις αναπαριστούν την τυρβώδη ροή, τις ροές ενέργειας από/προς το έδαφος, την ηλιακή ακτινοβολία, τη ροή της υγρασίας και της θερμοκρασίας από και προς το έδαφος, τη δημιουργία και τα αποτελέσματα σωρρειτόμορφων νεφικών σχηματισμών κ.α.

1.2.4 Παραμετροποιήσεις Φυσικών Διαδικασιών

Παραμετροποίηση του Εδάφους

Η παραμετροποίηση του εδάφους (land-surface parameterization schemes) είναι ένα σημαντικό συστατικό των ατμοσφαιρικών μοντέλων επειδή αναπαριστάνει τις ροές υγρασίας και θερμότητας που λαμβάνουν χώρα στο έδαφος και στην επιφάνεια

των χερσαίων περιοχών της γης. Πειράματα ευαισθησίας, με τη χρήση αριθμητικών μοντέλων πρόγνωσης καιρού, έχουν δείξει ότι εδάφη που είναι πιο υγρά από τη μέση κατάσταση τείνουν να υπερεκτιμούν τοπικά τα ποσά του νετού. Από την άλλη μεριά, μη-ρεαλιστική ξήρανση του εδάφους μπορεί να προκαλέσει υπερεκτίμηση της επιφανειακής θερμοκρασίας.

Οι Henderson-Sellers *et al.* (1995) έδειξαν ότι οι ανωμαλίες της υγρασίας του εδάφους παραμένουν στα μοντέλα πρόγνωσης καιρού καθώς προκαλούν σημαντικές διαφορές στην προβλεπόμενη βροχή κατά τη διάρκεια των πρώτων ημερών της πρόγνωσης.

Παραμετροποίηση των ροών ενέργειας

Πολλές μελέτες έχουν δείξει τη σημασία των θερμοκρασιών της θάλασσας για την κυκλοφορία της ατμόσφαιρας.

Πάνω από την ξηρά, η μεταβλητότητα των ιδιοτήτων του εδάφους επηρεάζει το διαχωρισμό των επιφανειακών ροών ενέργειας και τελικά ελέγχει τα μετεωρολογικά πεδία κυρίως κοντά στην επιφάνεια.

Η εξέλιξη του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και η ανάπτυξη συνοπτικών και μέσης κλίμακας κυκλοφοριών, όπως τα μέτωπα, εξαρτάται από την υδρολογία του εδάφους.

Εδώ, θα εστιάσουμε την προσοχή μας στην παραμετροποίηση των ροών ενέργειας από τη θάλασσα προς την ατμόσφαιρα.

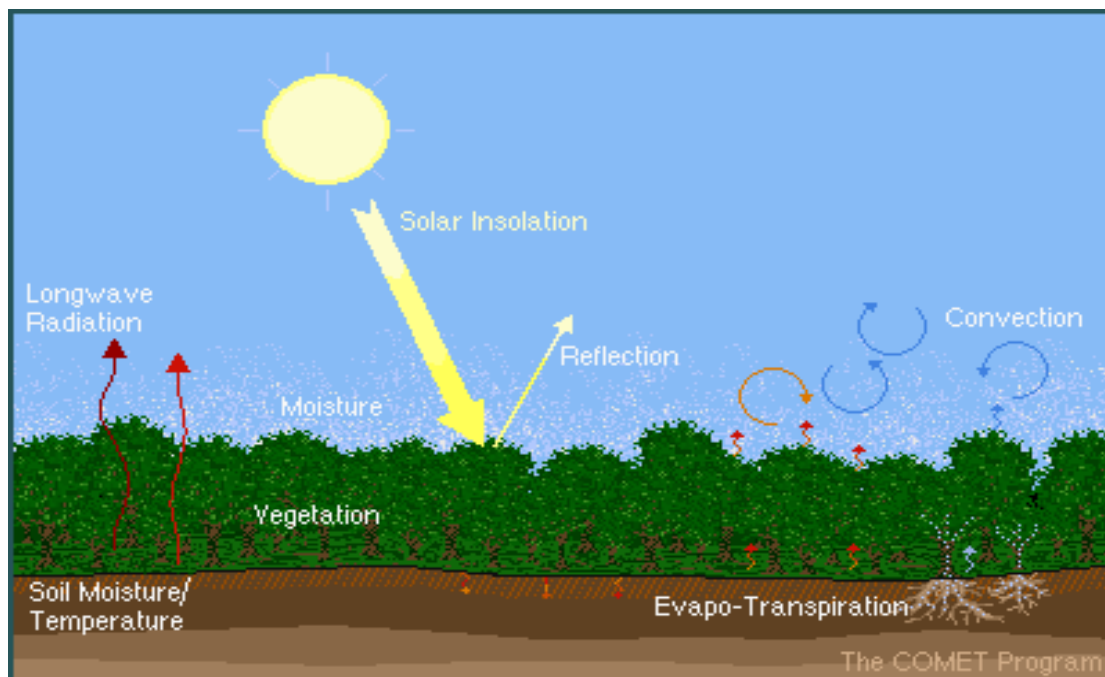
Αεροδυναμικές σχέσεις

Η αισθητή και η λανθάνουσα θερμότητα μεταφέρονται ανάμεσα στην επιφάνεια και την ατμόσφαιρα με τυρβώδη ανάμιξη. Οι αεροδυναμικές σχέσεις χρησιμοποιούνται συχνά στα αριθμητικά μοντέλα για την αναπαράσταση των ροών από τη θάλασσα.

Η μέση κατακόρυφη τυρβώδης ροή από την επιφάνεια, F_x , μίας ποσότητας X δίνεται από τη σχέση:

$$F_x / \rho^* = -K_x |v_1 - v_0| (X_1 - X_0)$$

όπου ρ^* είναι η ατμοσφαιρική πυκνότητα στην επιφάνεια, v_1 είναι η μέση ταχύτητα του οριζόντιου ανέμου στο κατώτερο επίπεδο του μοντέλου, v_0 είναι η ταχύτητα στην επιφάνεια (0 πάνω από ξηρά και συνήθως είτε 0 ή ίση με την ταχύτητα των επιφανειακών ρευμάτων πάνω από τη θάλασσα), X_1 και X_0 είναι οι τιμές της ποσότητας X στο κατώτερο επίπεδο του μοντέλου και στην επιφάνεια, αντίστοιχα, και K_x είναι ο συντελεστής μεταφοράς ο οποίος είναι γενικά συνάρτηση της ευστάθειας της ατμόσφαιρας, της επιφανειακής τραχύτητας, του ύψους του χαμηλότερου επιπέδου του μοντέλου και άλλων παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την κατάσταση της επιφάνειας.



Σχήμα 1. Απεικόνιση της μεταφοράς ενέργειας από τον ήλιο στο έδαφος και από το έδαφος και τα φυτά στο διάστημα. COMET Program (www.comet.ucar.edu)

Ιξώδες Υπόστρωμα

Κοντά στην επιφάνεια του εδάφους υπάρχει ένα λεπτό στρώμα που δεν επιτρέπει την ανάπτυξη τυρβώδους ροής και ονομάζεται τυρβώδες υπόστρωμα.

Επομένως, η ορμή, η θερμότητα και η υγρασία μεταφέρονται μέσα από αυτό το στρώμα μέσω μοριακής διάχυσης. Επειδή η μοριακή διάχυση είναι πολύ ασθενέστερη από την τυρβώδη διάχυση, η παρουσία του ιξώδους υποστρώματος περιορίζει τις ροές ενέργειας από την επιφάνεια.

Παραμετροποίηση των Νεφών και του Υετού

Η παραμετροποίηση των μεγάλης-κλίμακας διαδικασιών υγροποίησης και νεφών (*grid-scale precipitation and cloud parameterization*) αναφέρεται στην προσομοίωση από το μοντέλο των νεφών και των διαδικασιών υγροποίησης που απομακρύνουν την πλεονάζουσα ατμοσφαιρική υγρασία η οποία προέρχεται από τα προγνωστικά πεδία του ανέμου, της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Αυτά τα πεδία έχουν υπολογιστεί μέσω των δυναμικών διαδικασιών του μοντέλου.

Η παραμετροποίηση της ανωμεταφοράς (*convective parameterization*) είναι η μέθοδος με την οποία τα μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τα αποτελέσματα της ανωμεταφοράς (σε κλίμακες μικρότερες από τη χωρική διακριτοποίηση) μέσω της ανακατανομής της θερμοκρασίας και της υγρασίας στην κατακόρυφη διεύθυνση.

Με αυτή την παραμετροποίηση μειώνεται η αστάθεια της ατμόσφαιρας και έτσι αποτρέπεται η δημιουργία μη-ρεαλιστικής μεγάλης-κλίμακας ανωμεταφοράς (από το πρότυπο των μεγάλης-κλίμακας διαδικασιών υγροποίησης) και κυκλογένεσης στα κατώτερα επίπεδα του μοντέλου.

Το πρότυπο παραμετροποίησης των μεγάλης-κλίμακας διαδικασιών υγροποίησης και νεφών (PCP – *grid-scale Precipitation and Cloud Parameterization scheme*) υπολογίζει τον υετό βασιζόμενο στη σχετική υγρασία έτσι ώστε να απομακρύνει την πλεονάζουσα υγρασία στην κλίμακα του πλέγματος του μοντέλου.

Τα νέφη επίσης υπολογίζονται μέσω της σχετικής υγρασίας έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν αργότερα από το πρότυπο της ακτινοβολίας.

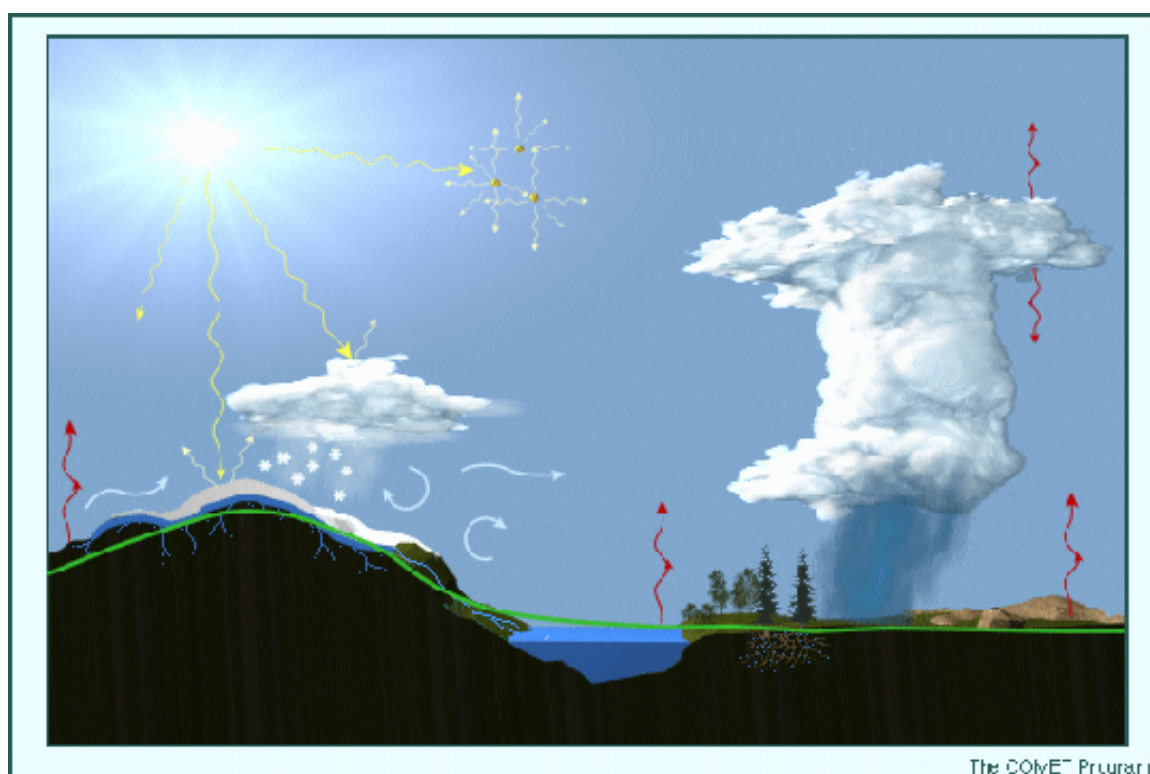
Το πρότυπο παραμετροποίησης της ανωμεταφοράς (*Convective Parameterization scheme - CP*) απομακρύνει την υπάρχουσα αστάθεια και προσομοιώνει τα αποτελέσματα των μικρής-κλίμακας διαδικασιών ανωμεταφοράς στο μεγαλύτερης κλίμακας περιβάλλον του μοντέλου. Ο υετός είναι μόνο ένα παράπλευρο αποτέλεσμα του σχήματος.

Καθώς αυξάνεται η ανάλυση των μοντέλων, όλο και περισσότερες λεπτομέρειες απαιτούνται για τη ρεαλιστικότερη αναπαράσταση των μικρής-

κλίμακας διαδικασιών που συμβαίνουν στα νέφη. Επιπλέον, μερικές μέσης-κλίμακας κυκλοφορίες που δημιουργούνται από ανωμεταφορά μπορούν πλέον να αναλυθούν. Αυτό έχει γίνει εφικτό και από

α) Την ανάπτυξη παραμετροποιήσεων μεγάλης-κλίμακας διαδικασιών υγροποίησης και νεφών που περιλαμβάνουν πληροφορίες για τα διάφορα υδρομετέωρα.

β) Από τη σύνδεση των σχημάτων μεγάλης-κλίμακας διαδικασιών υγροποίησης (PCP) και ανωμεταφοράς (CP) τα οποία ανταλλάσσουν πληροφορίες για τις μικροφυσικές ιδιότητες των νεφών.



Σχήμα 2. Απεικόνιση της μεταφοράς ενέργειας από τον ήλιο προς το έδαφος και η δημιουργία ανοδικών ρευμάτων αέρα από το έδαφος προς το διάστημα που προκαλεί σωρειτόμορφα νέφη. COMET Program (www.comet.ucar.edu)

1.2.5 Το σύστημα στοχαστικής πρόγνωσης (ensemble forecasting system)

Η ατμόσφαιρα είναι ένα χαοτικό σύστημα που έχει ως αποτέλεσμα μικρά λάθη στην εκτίμηση της παρούσας κατάστασης να μπορούν να διευρύνονται και να έχουν

μεγάλη επίδραση στις προγνώσεις. Εξαιτίας του περιορισμένου αριθμού των διαθέσιμων παρατηρήσεων και της ανομοιογενούς κατανομής τους, υπάρχει πάντοτε κάποια αβεβαιότητα στην εκτίμηση των παρόντων συνθηκών. Συγχρόνως τα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης είναι συστήματα διαφορικών εξισώσεων που χρησιμοποιούν προσεγγιστικές μεθόδους και που αναπαριστούν ένα μεγάλο πλήθος φυσικών διεργασιών μέσω παραμετροποιήσεων. Επομένως η ύπαρξη λαθών τόσο στην αποτύπωση της παρούσας κατάστασης όσο και στην αριθμητική πρόγνωση είναι αναπόφευκτη.

Γενικά τα σφάλματα των αριθμητικών προγνώσεων προέρχονται από:

- Σφάλματα στις αρχικές συνθήκες των μοντέλων, π.χ. έλλειψη παρατηρήσεων, σφάλματα των οργάνων μέτρησης, σφάλματα του μοντέλου τα οποία διατηρούνται στο σύστημα αφομοίωσης δεδομένων.
- Το γεγονός ότι οι προγνωστικές εξισώσεις των μοντέλων είναι σχετικά απλοποιημένες μορφές των φυσικών νόμων που διέπουν την κίνηση της ατμόσφαιρας. Επίσης οι εξισώσεις επιλύονται με αριθμητικές μεθόδους, άρα προσεγγιστικά.
- Το γεγονός ότι οι διάφορες φυσικές διεργασίες (π.χ. τυρβώδης ροή στο οριακό στρώμα, κατακόρυφη μεταφορά λόγω αστάθειας, ηλιακή ακτινοβολία) αναπαριστώνονται μέσω παραμετροποιήσεων που περιέχουν υποθέσεις και προσεγγίσεις.
- Τη χωρική ανάλυση του μοντέλου που δεν επιτρέπει σε διαταραχές μικρότερης κλίμακας να αναλυθούν επαρκώς. Η χωρική ανάλυση θέτει ένα όριο και στην ανάλυση των χαρακτηριστικών του εδάφους (π.χ. ορογραφία, φυτοκάλυψη). Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι στα αριθμητικά μοντέλα οι τιμές των διαφόρων μετεωρολογικών παραμέτρων και των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών της περιοχής ολοκλήρωσης αντιστοιχούν στη μέση τιμή τους στο κουτί πλέγματος και όχι σε σημειακές τιμές.

Πρακτικά, τα παραπάνω σφάλματα περιορίζουν τη δυνατότητα πραγματοποίησης λεπτομερών προγνώσεων καιρού σε χρονικές κλίμακες μεγαλύτερες περίπου από μία εβδομάδα.

Αφού η πραγματική κατάσταση της ατμόσφαιρας σε μια δεδομένη χρονική στιγμή δεν είναι πλήρως γνωστή, μία ολοκληρωμένη περιγραφή του προβλήματος της πρόγνωσης καιρού πρέπει να διατυπωθεί σε σχέση με τη χρονική εξέλιξη μίας

κατάλληλης συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Η στοχαστική πρόγνωση εμφανίζεται σαν η μόνη εφικτή μέθοδος για την πρόγνωση της εξέλιξης της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας για την ατμόσφαιρα, πέρα από τη χρονική κλίμακα στην οποία η αύξηση των σφαλμάτων παύει να είναι γραμμική. Οι Lorenz (1965) και Epstein (1969) εισήγαγαν την ιδέα της στοχαστικής πρόγνωσης στην αριθμητική πρόγνωση του καιρού και από τις αρχές του 1990 χρησιμοποιείται επιχειρησιακά από μεγάλα προγνωστικά κέντρα. Στη στοχαστική πρόγνωση η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας κατά τον αρχικό χρόνο αναπαριστάνεται μέσω ενός πεπερασμένου συνόλου πιθανών αρχικών συνθηκών. Ένα μη-γραμμικό ατμοσφαιρικό μοντέλο ολοκληρώνεται με αυτές τις αρχικές συνθήκες και θεωρείται ότι οι ιδιότητες της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας σε κάθε προγνωστική ώρα περιγράφονται από τα διάφορα στατιστικά που υπολογίζονται από το παραπάνω σύνολο στοχαστικών προγνώσεων. Επομένως αυτή η μέθοδος παρέχει ένα μέτρο του βαθμού της αβεβαιότητας των αριθμητικών προγνώσεων, γνωρίζοντας ότι οι προγνώσεις περιέχουν σφάλματα. Η επιτυχία του συστήματος στοχαστικής πρόγνωσης εξαρτάται από την ικανότητά του να εστιάζεται σε περιοχές όπου μικρές αβεβαιότητες των αναλύσεων είναι πιθανό να έχουν σημαντική επίδραση στις προγνώσεις (Persson 2003). Η πιο διαδεδομένη μέθοδος στοχαστικής πρόγνωσης είναι η λεγόμενη «στοχαστική πρόγνωση των φτωχών» (poor-man's ensemble) η οποία χρησιμοποιείται με διάφορες παραλλαγές (Rousseau and Chapelet 1985, Talagrand et al. 1998, Atger 1999, Zeihmann 1998, 2000). Αυτή η μέθοδος βασίζεται στο συνδυασμό ανεξάρτητων αριθμητικών προγνώσεων από διάφορα μοντέλα ή προγνωστικά κέντρα.

1.3 Τρόπος λειτουργίας των μοντέλων πρόγνωσης καιρού

Μπορεί να θεωρηθεί ότι η ατμόσφαιρα και η γη αποτελούν ένα κλειστό σύστημα το οποίο ακολουθεί μια μοναδική και θεωρητικά προβλέψιμη πορεία. Από μία γνωστή αρχική κατάσταση της ατμόσφαιρας σε μια δεδομένη χρονική στιγμή (που γίνεται από τις παρατηρήσεις καιρού) προσδιορίζεται η μελλοντική της κίνηση, δηλαδή γίνεται πρόγνωση μονοσήμαντα ορισμένη.

Η συμπεριφορά της ατμόσφαιρας καθορίζεται από ένα σύνολο φυσικών νόμων που μπορούν να εκφραστούν από μαθηματικές εξισώσεις. Ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο πρόγνωσης είναι στην ουσία ένα σύστημα προσομοίωσης των φυσικών διαδικασιών

που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα. Οι παραπάνω διαδικασίες προσεγγίζονται από διαφορετικές εξισώσεις, η επίλυση των οποίων οδηγεί στην πρόγνωση του καιρού. Η ατμόσφαιρα ως γνωστόν είναι ένα συνεχές μέσο. Ωστόσο οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της την αντιμετωπίζουν σαν ένα μέσο που αποτελείται από διακριτά σημεία (grid points). Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα τρισδιάστατο πλέγμα σημείων πάνω στο οποίο πραγματοποιούνται όλοι οι απαιτούμενοι υπολογισμοί. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν τελικά αφορούν μόνο τα συγκεκριμένα σημεία. Για τα υπόλοιπα ο υπολογιστής έχει πλήρη άγνοια.

Η αριθμητική πρόγνωση στράφηκε πολύ γρήγορα στη χρήση υπερυπολογιστών για δύο λόγους:

- Τα μετεωρολογικά μοντέλα είναι γενικά μεγάλοι (χρονοβόροι) κώδικες αφού για την εκτέλεσή τους απαιτείται ένα μεγάλο πλήθος επεξεργασιών και υπολογισμών ενός τεράστιου όγκου δεδομένων.
- Τα αποτελέσματα των μετεωρολογικών μοντέλων πρέπει να παρέχονται σε ένα πολύ σύντομο χρονικό διάστημα στα τμήματα επεξεργασίας και μελέτης αυτών, προκειμένου να εξαχθούν έγκαιρα τα τελικά συμπεράσματα της πρόγνωσης και κατόπιν να διοχετευθούν στους τελικούς αποδέκτες. Για παράδειγμα η πρόβλεψη ενός καταστροφικού φαινομένου από το αριθμητικό μοντέλο θεωρείται μη εκμεταλλεύσιμη πληροφορία αν χρονικά έπεται του φαινομένου.

Ουσιαστική λύση στο πρόβλημα του χρόνου εκτέλεσης επήλθε μόνο τα τελευταία χρόνια και δεν ήταν καθόλου τυχαίο ότι συνέπεσε χρονικά με τη σημαντική πρόοδο που σημειώθηκε στο χώρο των υπερυπολογιστών. Με τις δυνατότητες και τα μέσα που διέθετε πλέον ο χώρος της πληροφορικής, η αριθμητική πρόγνωση σημείωσε σημαντικά βήματα αφού δημιουργήθηκε η υποδομή για ανάπτυξη και εφαρμογή πολύ αξιόπιστων ατμοσφαιρικών μοντέλων που μπορούσαν να προσομοιώνουν πλέον την ατμόσφαιρα με πολύ ρεαλιστικό τρόπο.

Οι υπερυπολογιστές (αλλιώς παράλληλες μηχανές ή πολυεπεξεργαστικά συστήματα), είναι εξειδικευμένοι υπολογιστές που αναπτύχθηκαν για την εκτέλεση μεγάλων προγραμμάτων όπως τα μετεωρολογικά μοντέλα. Τα βασικά τους χαρακτηριστικά δε διαφέρουν από τα αντίστοιχα των μονοεπεξεργαστικών συστημάτων, για παράδειγμα διαθέτουν μνήμη, δίσκους, λειτουργικό σύστημα UNIX

κτλ. Η ουσιαστική τους διαφορά είναι ότι δε διαθέτουν μόνο ένα αλλά αρκετούς επεξεργαστές, οι οποίοι εξασφαλίζουν στο χρήστη αρκετά μεγάλη υπολογιστική ισχύ και κατά συνέπεια γρήγορη επεξεργασία. Οι επεξεργαστές αυτοί συνεργάζονται για την επίτευξη ενός κοινού σκοπού, δηλαδή για την επίλυση ενός προβλήματος σε όσον το δυνατό συντομότερο χρονικό διάστημα. Για τη σωστή συνεργασία των επεξεργαστών οι τελευταίοι ανταλλάσσουν μηνύματα και πληροφορίες μεταξύ τους, μέσω ενός ταχύτατου εσωτερικού δικτύου.

1.4 Κατηγορίες μοντέλων πρόγνωσης καιρού

1.4.1 Μοντέλα πεπερασμένων διαφορών και φασματικά μοντέλα

- **Μοντέλα πεπερασμένων διαφορών σε σημεία πλέγματος**

Με αυτή τη μέθοδο οι εξισώσεις επιλύονται προσεγγιστικά σε σημεία πλέγματος που είναι ομοιόμορφα ή ανομοιόμορφα κατανομημένα και καλύπτουν όλη την περιοχή ενδιαφέροντος στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση. Πολύ σημαντική παράμετρος είναι η χωρική ανάλυση του μοντέλου. Δηλαδή, η απόσταση μεταξύ των σημείων πλέγματος.

Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε το μέγεθος της περιοχής ανάμεσα στα σημεία πλέγματος του μοντέλου μας, αφού οι διάφορες ατμοσφαιρικές διαδικασίες που συμβαίνουν σε κλίμακες μικρότερες από τη χωρική του διακριτοποίηση δεν μπορούν να αναλυθούν από τις εξισώσεις του μοντέλου.

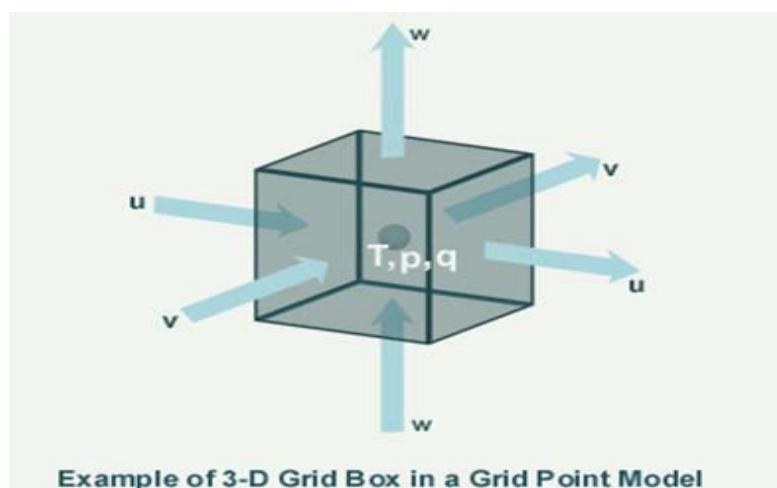
Σε ένα μοντέλο οριζόντιας χωρικής διακριτοποίησης 50χλμ, κάθε σημείο πλέγματος στην πραγματικότητα είναι τοποθετημένο στο κέντρο μιας περιοχής με έκταση $50 \times 50 = 2500 \text{ χλμ}^2$, την οποία και αντιπροσωπεύει. Στην οριζόντια διεύθυνση, το κεντρικό «σημείο πλέγματος» αναπαριστάνει τη μέση τιμή του πεδίου στα 2500 χλμ^2 που περικλείουν το «σημείο πλέγματος».

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε το μέγεθος μιας κυψελίδας με διαστάσεις 50χλμ x 50χλμ και το σημείο 26 θεωρείτε το κέντρο αυτής για το οποίο λαμβάνουμε τις τιμές.



Σχήμα 3. Απεικόνιση του σχήματος μιας κυψελίδας διαστάσεων 50χλμ x 50χλμ. COMET Program (www.comet.ucar.edu)

Στην πραγματικότητα τα μοντέλα σημείων πλέγματος αναπαριστούν την ατμόσφαιρα με τρισδιάστατες κυψελίδες (grid-box) και οι τιμές στα σημεία πλέγματος αντιστοιχούν στη μέση τιμή του πεδίου στον όγκο της κυψελίδας.

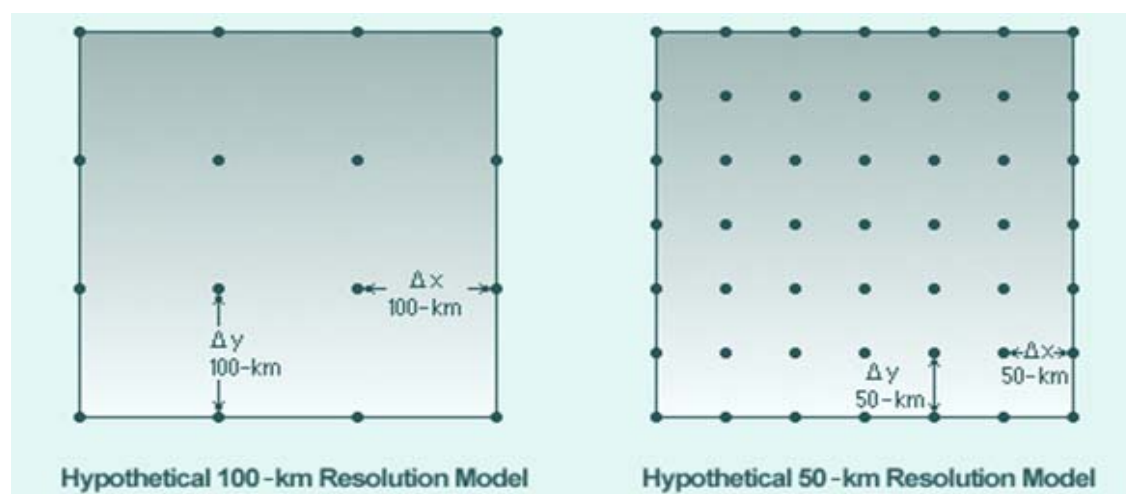


Σχήμα 4. Τρισδιάστατη απεικόνιση μιας κυψελίδας. COMET Program (www.comet.ucar.edu)

Μία αύξηση της χωρικής διακριτοποίησης του μοντέλου αυξάνει την απαιτούμενη υπολογιστική δύναμη καθώς το μοντέλο πρέπει να υπολογίσει τις τιμές των μεταβλητών σε περισσότερα σημεία πλέγματος.

Αν η απόσταση ανάμεσα στα σημεία πλέγματος (δηλαδή η χωρική διακριτοποίηση) μειωθεί στο μισό και στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις, τότε ο αριθμός των σημείων πλέγματος για την περιοχή ολοκλήρωσης τετραπλασιάζεται.

Σαν συνέπεια της μείωσης της χωρικής διακριτοποίησης (στο μισό), το μήκος του χρονικού βήματος (Δt) που απαιτείται για να είναι ευσταθής η λύση πρέπει να μειωθεί στο μισό. Σε αυτή την περίπτωση, η μείωση της χωρικής διακριτοποίησης στο μισό, οδηγεί τελικά σε αύξηση της απαιτούμενης υπολογιστικής δύναμης κατά 8 φορές. Γενικά, αν η χωρική διακριτοποίηση γίνει υψηλότερη τότε το χρονικό βήμα πρέπει να μειωθεί. Αυτό σημαίνει ότι απαιτούνται περισσότερα βήματα για να πάρουμε μία πρόγνωση ίδιας διάρκειας.



Σχήμα 5. Χαμηλή χωρική ανάλυση των 100χλμ αριστερά. Υψηλή χωρική ανάλυση των 50χλμ δεξιά. COMET Program (www.comet.ucar.edu)

Ο τύπος που δίνει την σχέση του χρονικού βήματος με την χωρική διακριτοποίηση είναι $\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\Delta t}$ όπου:

Δt = χρονικό βήμα (time step)

Δx = χωρική διακριτοποίηση

Εναλλασσόμενα πλέγματα

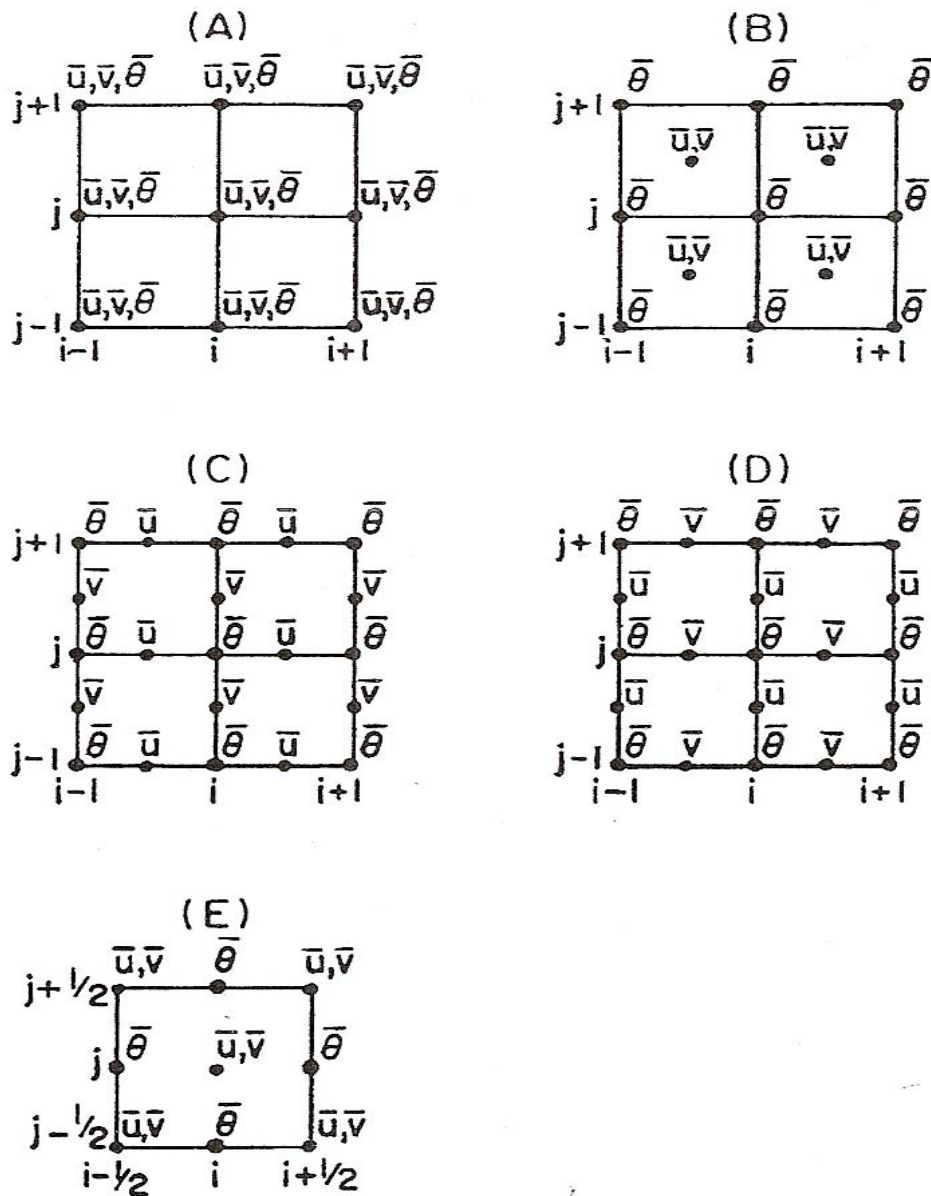
Τα μοντέλα σημείων πλέγματος αναπαριστούν την ατμόσφαιρα με τρισδιάστατες κυψελίδες (grid-box).

Στο σχήμα 4, η θερμοκρασία, η πίεση και η υγρασία (T , p , q), φαίνονται στο κέντρο της κυψελίδας και αναπαριστούν τις μέσες τιμές των πεδίων στην κυψελίδα. Με παρόμοιο τρόπο μπορούν να υπολογιστούν και οι τιμές των συνιστωσών του ανέμου (u , v , w) στα σημεία πλέγματος.

Όμως για καλύτερα αποτελέσματα στην πράξη εφαρμόζονται τροποποιημένες τεχνικές. Στο σχήμα 4 φαίνεται ότι οι u και v συνιστώσες, που είναι τοποθετημένες στις πλευρές της κυψελίδας, αναπαριστούν τη μέση τιμή των αντίστοιχων συνιστωσών ανάμεσα στο κέντρο αυτής της κυψελίδας και της επόμενης. Παρομοίως αναπαριστάνεται η κατακόρυφη ταχύτητα w , στις άνω και κάτω πλευρές της κυψελίδας. Αυτή η διάταξη των μεταβλητών στην κυψελίδα πλέγματος παρουσιάζει πλεονεκτήματα έναντι της κλασσικής μεθόδου (στην οποία όλες οι μεταβλητές υπολογίζονταν στα ίδια σημεία) στον υπολογισμό των παραγώγων, και τα πλέγματα που χρησιμοποιούν αυτή τη διάταξη λέγονται εναλλασσόμενα πλέγματα (staggered grids).

Εναλλασσόμενα πλέγματα του Arakawa

Παρακάτω παρατηρούμε την διάταξη των μεταβλητών του ανέμου (u,v) και της δυναμικής θερμοκρασίας (θ) σε πέντε τύπους πλέγματος. Το πρώτο πλέγμα (A) είναι μη εναλλασσόμενο ενώ τα υπόλοιπα (B,C,D,E) είναι εναλλασσόμενα.



Σχήμα 6. Μη εναλλασσόμενο πλέγμα A και εναλλασσόμενα πλέγματα B,C,D,E Arakawa and Lamb, 1977 (Journal of Computational Physics, 2005).

Πρέπει να γνωρίζουμε ότι, τα εναλλασσόμενα πλέγματα χρειάζονται το μισό χρονικό βήμα (time step) από το μη-εναλλασσόμενο πλέγμα A.

Ελέγχοντας την αριθμητική επίλυση των κυμάτων βαρύτητας, οι Arakawa (1972), Mesinger and Arakawa (1976) και Arakawa and Lamb (1977) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το μη-εναλλασσόμενο πλέγμα A και το εναλλασσόμενο πλέγμα D υστερούν συγκρινόμενα με τις δυνατότητες που παρουσιάζουν τα B, C και E.

Η επικράτηση των κατηγοριών πλέγματος B, C και E εντοπίζεται στην ακρίβεια των προσεγγίσεων φυσικών διεργασιών από δεύτερης τάξης πεπερασμένες διαφορές, καθώς και στην ταχύτητα των επαναληπτικών μεθόδων.

Οι Arakawa and Lamb (1977) επίσης έδειξαν ότι μεταξύ των πλεγμάτων B και C, το C είναι καλύτερο αν το μέγεθος της κυψελίδας (grid-box) είναι μικρότερο από την ακτίνα παραμόρφωσης του Rossby.

- **Μοντέλα φασματικών μεθόδων**

Τα φασματικά μοντέλα αναπαριστούν τις χωρικές μεταβολές των μετεωρολογικών παραμέτρων (όπως του γεωδυναμικού ύψους) σαν ένα πεπερασμένο πλήθος κυμάτων με διαφορετικά μήκη κύματος.

Αυτή η τεχνική αναπτύχθηκε σαν ένα μέσο αύξησης της ταχύτητας και κατ'επέκταση της χωρικής ανάλυσης των μοντέλων παγκόσμιας κλίμακας. Όμως, καθώς η υπολογιστική ισχύς αυξάνεται, όλο και περισσότερα μοντέλα τείνουν να επιλύουν τις εξισώσεις σε σημεία πλέγματος.

1.4.2 Κατηγορίες σύμφωνα με το πεδίο χρήσης των μοντέλων

Ανάλογα με τον σκοπό που χρησιμοποιούνται τα μοντέλα, χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

1. Μοντέλα μικρής και μέσης κλίμακας (Small and mesoscale models)
 - εποχιακές προγνώσεις καιρού, μοντέλα παγκόσμιας κλίμακας (global models)
 - περιοχικά μοντέλα (regional or limited area models)
 - μοντέλα μέσης κλίμακας (mesoscale models)
2. Κλιματικές προγνώσεις (Μοντέλα γενικής κυκλοφορίας – General circulation models)
 - μοντέλα παγκόσμιας κλίμακας (global models)
 - περιοχικά μοντέλα (regional or limited area models)

3. Μοντέλα που εφαρμόζονται σε μελέτες συγκεκριμένων μετεωρολογικών φαινομένων (μοντέλα με πλήρεις φυσικές διεργασίες ή ιδεατά μοντέλα), π.χ. μέτωπα, κυκλογένεσης, τοπικοί κυκλώνες.
4. Μοντέλα που εφαρμόζονται σε μελέτες μικροκλίμακας, π.χ. πόλεις, δρόμοι (street-canyons).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Το προγνωστικό μοντέλο WRF (Weather Research and Forecasting Model)

2.1 Σύντομη περιγραφή

Το WRF είναι ένα, μέσης κλίμακας, αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού. Ανήκει στην νέα γενιά μοντέλων, που σκοπό έχει να προάγει την κατανόηση και την πρόγνωση των μέσης κλίμακας συστημάτων καθώς και να δημιουργήσει στενότερους δεσμούς μεταξύ της ερευνητικής και επιχειρησιακής πρόγνωσης. Χαρακτηρίζεται από πολλαπλούς δυναμικούς πυρήνες, ένα τρισδιάστατο σύστημα προσομοίωσης μεταβαλλόμενων δεδομένων και ένα λογισμικό που επιτρέπει τον υπολογιστικό παραλληλισμό και την επέκταση του συστήματος.

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί προηγμένες αριθμητικές τεχνικές, τεχνικές αφομοίωσης, καθώς και ανώτερη φυσική κατάλληλη ιδιαίτερα για τον χειρισμό της ανωμεταφοράς και του υετού μέσης κλίμακας. Διαθέτει 21 μέλη στοχαστικής πρόγνωσης (ensemble). Σχεδιάστηκε για ευρύ φάσμα εφαρμογών, από εξειδικευμένη έρευνα μέχρι επιχειρησιακές προγνώσεις, εφαρμόζοντας χωρική ανάλυση στα οριζόντια πλέγματα κυρίως από 1 έως 10 χιλιόμετρα. Το πλέγμα που χρησιμοποιεί είναι το εναλλασσόμενο Arakawa C-Grid.

Το μοντέλο αυτό, γνωρίζοντας τα λάθη άλλων αντίστοιχων μοντέλων, είναι υποψήφιο για να αντικαταστήσει μερικά από αυτά όπως είναι το μέσης κλίμακας MM5 του Πανεπιστημίου της Πενσυλβάνια (PSU/NCAR), το αριθμητικό μοντέλο ETA καθώς και το RUC (Rapid Update Cycle) του Εθνικού Κέντρου Περιβαλλοντικών Προβλέψεων (NCEP).

Η πρώτη έκδοση του WRF, γνωστή ως WRF 1.0, δημοσιεύτηκε στις 30 Νοεμβρίου του 2000. Στην συνέχεια ακολούθησε η αναβάθμιση σε άλλες εκδόσεις με την τελευταία να εκδίδεται τον Ιούλιο 2009 με την έκδοση 3.1.1.

Σήμερα υπάρχουν πέντε ομάδες που εργάζονται για την ανάπτυξη του μοντέλου και 16 ομάδες που ειδικεύονται η κάθε μία σε ένα μέρος του WRF και φροντίζουν για την ανάπτυξή του. Στην προσπάθεια ανάπτυξης του μοντέλου συμβάλλουν μια σειρά από οργανισμούς και ερευνητικά κέντρα ανά τον κόσμο, μερικά εκ των οποίων είναι τα ακόλουθα: το Εθνικό Κέντρο Έρευνας της Ατμόσφαιρας (NCAR), η Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (NOAA), το Εθνικό Κέντρο Περιβαλλοντικών Προβλέψεων (NCEP) και το Εργαστήριο Προγνωστικών Συστημάτων (FSL), το

Γραφείο Καιρού της Αεροπορίας (AFWA), το Εργαστήριο Ναυτικών Ερευνών, το Πανεπιστήμιο της Οκλαχόμα, και η Διοίκηση Ομοσπονδιακής Αεροπορίας (FAA).

Εφαρμόζεται επιχειρησιακά ή ερευνητικά από μετεωρολογικές υπηρεσίες, ινστιτούτα και πανεπιστήμια, στις Η.Π.Α, το Μεξικό, την Ιταλία, την Ελλάδα, το Ισραήλ, την Σλοβενία, την Ινδία, την Ελβετία και την Κορέα.

Το WRF δίνει την δυνατότητα στους ερευνητές να διευθύνουν τις προσομοιώσεις που απεικονίζουν είτε τα πραγματικά στοιχεία είτε τις εξειδικευμένες διαμορφώσεις. Επίσης παρέχει επιχειρησιακές προγνώσεις που είναι εύκαμπτες και αποτελεσματικές υπολογιστικά, συνδυάζοντας την πρόοδο στην φυσική, τα μαθηματικά και την αφομοίωση των δεδομένων από την ερευνητική κοινότητα.

Το WRF έχει έναν συνεχώς αυξανόμενο αριθμό χρηστών και κάθε χρόνο διοργανώνονται στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας της Ατμόσφαιρας (NCAR) ημερίδες με σκοπό την ανάπτυξή του.

Το λογισμικό του WRF υποστηρίζει δύο δυναμικές επιλύσεις. Η μία είναι η Προηγμένη Έρευνα WRF (ARW) που αναπτύχθηκε και υποστηρίζεται από το μέσης και μικρής κλίμακας μετεωρολογικό τμήμα του Εθνικού Κέντρου Έρευνας της Ατμόσφαιρας (NCAR) και η άλλη έκδοση είναι η Μη-υδροστατική Μέσης Κλίμακας (NMM) που αναπτύχθηκε και υποστηρίζεται από το Εθνικό Κέντρο Περιβαλλοντικών Προβλέψεων (NCEP) με την υποστήριξη του Αναπτυξιακού Κέντρου Δοκιμών (Developmental Testbed Center).

2.1.1 Το Αριθμητικό Μοντέλο Πρόγνωσης WRF-ARW

Το WRF (ARW) είναι κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που εκτείνονται από μερικά μέτρα μέχρι χιλιάδες χιλιόμετρα περιλαμβάνοντας:

- Εξειδικευμένες προσομοιώσεις

Χρησιμοποιείται για προγνώσεις συγκεκριμένων φαινομένων και διαδικασιών που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα.

- Περιοχικές και παγκόσμιες εφαρμογές

Μπορεί να εφαρμοστεί τόσο για παγκόσμιες προγνώσεις όσο και για μέσης κλίμακας ή περιοχικές.

- Μελέτη παραμετροποιήσεων

Εφαρμόζονται παραμετροποιήσεις των φυσικών διαδικασιών όπως είναι η τυρβώδης ροή, η ηλιακή ακτινοβολία κ.α.

- Μελέτη δεδομένων αφομοίωσης

Γίνεται προσεκτική μελέτη των δεδομένων που εισάγονται στο μοντέλο.

- Προγνωστική έρευνα

Γίνεται έρευνα για τη βελτιστοποίηση της πρόγνωσης.

- Αριθμητική πρόγνωση του καιρού σε πραγματικό χρόνο

Επιχειρησιακή και ερευνητική πρόγνωση καιρού.

- Εφαρμογές συζευγμένων μοντέλων

Μπορεί να εφαρμοστεί σε σύζευξη με άλλα μοντέλα για εφαρμογές όπως η μεταφορά σκόνης, η ρύπανση της ατμόσφαιρας κ.α.

- Διδακτικοί σκοποί

Χρησιμοποιείται για διδακτικούς σκοπούς σε ερευνητικά και πανεπιστημιακά κέντρα.

Το μέσης και μικρής κλίμακας μετεωρολογικό τμήμα του Εθνικού Κέντρου Έρευνας της Ατμόσφαιρας (NCAR), ήδη διατηρεί και υποστηρίζει ένα υποσύνολο του συνολικού κώδικα του WRF (έκδοση 3) από τον Απρίλιο του 2008, που περιέχει:

- Πλαίσιο λογισμικού του WRF (WSF)
- Το Μοντέλο Προηγμένης Έρευνας (ARW) με ρουτίνες επίλυσης των δυναμικών διαδικασιών που περιλαμβάνει απλά και αμφίδρομα πλέγματα, μετακινούμενα πλέγματα και αφομοίωση των παρατηρήσεων. Τα μετακινούμενα πλέγματα προσφέρουν καλύτερα αποτελέσματα στην πρόγνωση γιατί έχουν την δυνατότητα να μετακινηθούν για συγκεκριμένο χρόνο, διεύθυνση και απόσταση. Στα νέα κελιά που δημιουργούνται τοποθετούνται αρχικές οριακές συνθήκες, αλλά συνεχίζει να υπάρχει σύνδεση μεταξύ αυτών και των κελιών στην αρχική περιοχή.

- Σύστημα Προεπεξεργασίας (WPS)
- Σύστημα προσομοίωσης (WRF-Var)
- Αριθμητικά και φυσικά πακέτα στα οποία συνεισφέρουν οι συνεργάτες του WRF και η ερευνητική κοινότητα

2.1.2 Το Αριθμητικό Μοντέλο Πρόγνωσης WRF-NMM

Το μη-υδροστατικό μοντέλο WRF-NMM έχει αναπτυχθεί από την Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (NOAA), και το Εθνικό Κέντρο Περιβαλλοντικών Προβλέψεων (NCEP). Το WRF-NMM σχεδιάστηκε για να είναι ένα ευέλικτο σύστημα προσομοίωσης της ατμόσφαιρας. Είναι κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που εκτείνονται από μερικά μέτρα μέχρι χιλιάδες χιλιόμετρα περιλαμβάνοντας:

- *Αριθμητική Πρόγνωση του Καιρού σε πραγματικό χρόνο*

Επιχειρησιακή και ερευνητική Πρόγνωση Καιρού

- *Έρευνα παραμετροποιήσεων*

Εφαρμόζονται παραμετροποιήσεις των φυσικών διαδικασιών όπως είναι η τυρβώδης ροή, η ηλιακή ακτινοβολία κ.α.

- *Εφαρμογές συζευγμένων μοντέλων*

Εφαρμόζεται σε σύζευξη με άλλα μοντέλα για εφαρμογές όπως η μεταφορά σκόνης, ρύπανση της ατμόσφαιρας κ.α

- *Διδακτικούς σκοπούς*

Χρησιμοποιείται για διδακτικούς σκοπούς σε Ερευνητικά και Πανεπιστημιακά κέντρα.

Οι υπηρεσίες NOAA/NCEP και το Developmental Testbed Center (DTC), υποστηρίζουν και διατηρούν ένα μέρος του συνολικού κώδικα (έκδοση 3) του WRF, που περιλαμβάνει:

- Το μη-υδροστατικό μέσης κλίμακας μοντέλο (NMM) που περιλαμβάνει απλά και αμφίδρομα στατικά πλέγματα
- Σύστημα προεπεξεργασίας (WPS)
- Αριθμητικά και Φυσικά πακέτα στα οποία συνεισφέρουν οι συνεργάτες του WRF και η ερευνητική κοινότητα
- Πρόγραμμα μετεπεξεργασίας (WPP) των αποτελεσμάτων του WRF και δημιουργίας γραφικών απεικονίσεων.

2.2 Το σύστημα προεπεξεργασίας WPS

Το σύστημα προεπεξεργασίας WPS (Preprocessing System) του WRF, αποτελείται από 3 προγράμματα (geogrid, ungrib, metgrid) των οποίων ο ρόλος είναι να προετοιμάσουν τα δεδομένα που θα εισαχθούν στο πραγματικό πρόγραμμα για τις πραγματικές προσομοιώσεις δεδομένων. Κάθε ένα από τα προγράμματα εκτελεί ένα στάδιο προετοιμασίας:

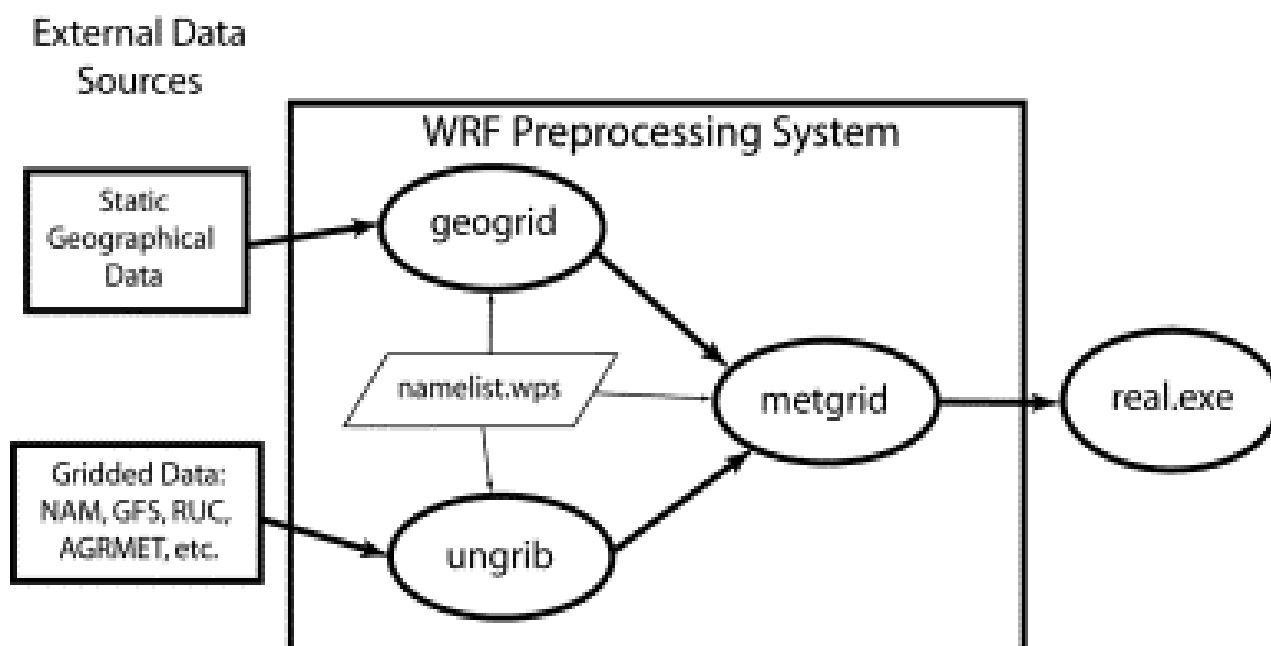
Το geogrid καθορίζει το πεδίο ορισμού του μοντέλου και παρεμβάλλει στατικά γεωγραφικά στοιχεία στα πλέγματα. Επιπρόσθετα παρεμβάλλει άλλες πληροφορίες όπως είναι οι κατηγορίες εδαφών, οι κατηγορίες χρήσεων γης, το υψόμετρο του εδάφους, η ετήσια μέση θερμοκρασία βαθιά μέσα στο έδαφος, η μηνιαία πορεία της βλάστησης, η μηνιαία αντανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας, η μέγιστη αντανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας από το χιόνι και οι κατηγορίες κλίσεων των πρανών. Οι παραπάνω παρεμβολές δεν μεταβάλλονται κι έτσι εισάγονται μόνο μια φορά στο μοντέλο.

Το ungrib εξάγει τα μετεωρολογικά πεδία από τα καταλλήλως επεξεργασμένα αρχεία. Τα αρχεία GRIB περιέχουν μετεωρολογικά πεδία για ποικίλα χρονικά διαστήματα που λαμβάνονται από άλλα περιοχικά ή παγκόσμια μοντέλα όπως το North American Mesoscale (NAM) ή το Global Forecast System (GFS). Και οι δύο εκδόσεις του GRIB χρησιμοποιούν διάφορους κώδικες για να προσδιορίσουν τις μεταβλητές και τα επίπεδα στο αρχείο GRIB. Το ungrib χρησιμοποιεί τους πίνακες αυτών των κωδικών που ονομάζονται Vtables (Variable tables), για να καθορίσει ποια πεδία θα εξάγει από το αρχείο GRIB. Οι πίνακες αυτοί παρέχονται από το NAM 104 και 212 πλεγμάτων, το NAM AWIP, το GFS, την ανάλυση του NCEP που αρχειοθετείται στο NCAR, το RUC (στοιχεία για τα επίπεδα πίεσης και τις

συντεταγμένες), ενώ τα στοιχεία για την επιφάνεια του εδάφους λαμβάνονται από το AFWA's AGRMET, το ECMWF (European Center for Medium Range Weather Forecasting), κ.ά.

Το metgrid παρεμβάλλει οριζόντια τα μετεωρολογικά πεδία που εξάγονται από το ungrib, στα πλέγματα του μοντέλου που καθορίζονται από το geogrid.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η σύνδεση των τριών παραπάνω προγραμμάτων. Τελικό αποτέλεσμα είναι το αρχείο real.exe



Σχήμα 7. Απεικόνιση της συνεργασίας του geogrid, του ungrib και του metgrid για την εξαγωγή του αρχείου real.exe. (ARW User's Guide 2008).

2.3 Το λογισμικό του WRF

Το λογισμικό του WRF στηρίζεται στην έκδοση 5 ή νεότερη του Perl και σε κάποιες εφαρμογές του UNIX όπως είναι: csh and Bournel shell, make, M4, sed, awk και το uname command.

Αποτελείται από μία αρχιτεκτονική λογισμικού με στρώσεις που επιτρέπει την φορητότητα, την εύκολη διαμόρφωση και την επαναχρησιμοποίηση. Οι στρώσεις είναι οι τρεις παρακάτω: ένα στρώμα επίλυσης που είναι συνήθως γραμμένο από τους επιστήμονες, ένα στρώμα «οδηγός» που είναι υπεύθυνο για την διανομή και αποδιανομή του χώρου και τον έλεγχο της ολοκλήρωσης της ακολουθίας και του I/O

και ένα στρώμα μεσολάβησης που επικοινωνεί μεταξύ του μοντέλου και του «οδηγού». Κατά αυτόν τον τρόπο, ο κώδικας του χρήστη απομονώνεται από τα προβλήματα του παραλληλισμού.

Το λογισμικό του μοντέλου χρησιμοποιεί την γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN 90.

Ένας μεταγλωττιστής (A/C compiler), απαιτείται για να μεταγλωττίζει τα προγράμματα και τις βιβλιοθήκες στα εργαλεία και τους εξωτερικούς καταλόγους. Για την κατανομή της επεξεργασμένης μνήμης, πρέπει να εγκατασταθεί το MPI (Message Passing Interface) και άλλα σχετικά εργαλεία.

Υπάρχουν δύο βήματα για το στήσιμο του WRF: η διαμόρφωση και η σύνταξη.

➤ Διαμόρφωση

Η διαμόρφωση προσπαθεί αρχικά να εντοπίσει τις αναγκαίες βιβλιοθήκες όπως είναι το NetCDF ή HDF και τα εργαλεία όπως το Perl.

Το πρόγραμμα της διαμόρφωσης, διαμορφώνει το μοντέλο για να είναι συμβατό με το εκάστοτε σύστημα επεξεργασίας. Το πρόγραμμα της διαμόρφωσης, καλεί στη συνέχεια την εντολή UNIX `uname` για να ανακαλύψει ποια πλατφόρμα συντάσσετε επάνω. Στη συνέχεια, καλεί το πρόγραμμα Perl `arch/Config_new.pl` το οποίο διατρέχει μία λίστα από γνωστές μηχανές διαμόρφωσης και επιδεικνύει στο χρήστη έναν κατάλογο διαθέσιμων επιλογών. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια αυτών των επιλογών, δημιουργείται το αρχείο `configure.wrf` στον κορυφαίο κατάλογο. Αυτό το αρχείο μπορεί να διορθωθεί αλλά οι αλλαγές θα είναι προσωρινές, δεδομένου ότι θα διαγραφεί στην επόμενη εκτέλεση του προγράμματος διαμόρφωσης.

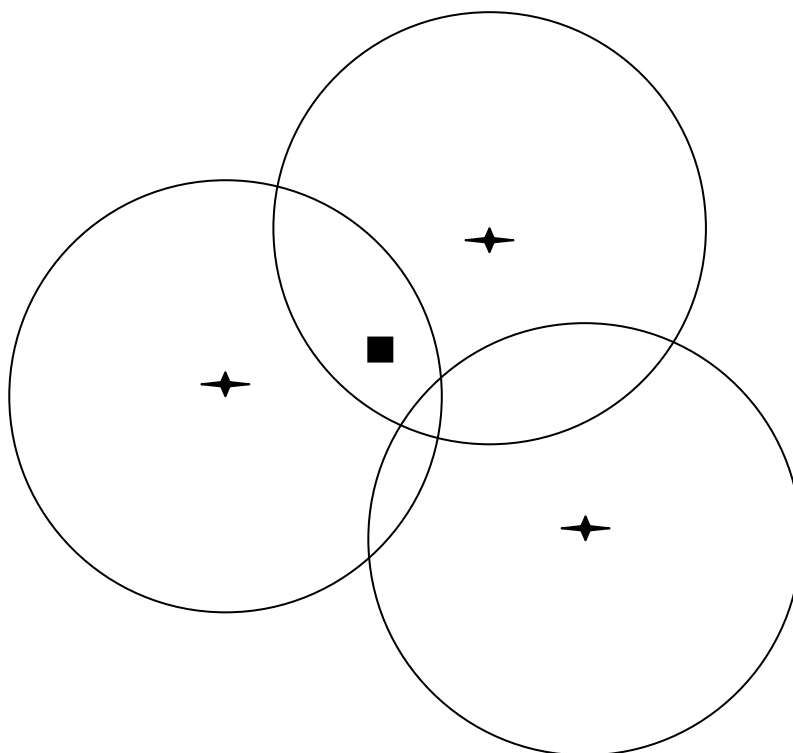
➤ Σύνταξη

Το πρόγραμμα της σύνταξης, χρησιμοποιείται για να συντάξει τον κώδικα του WRF αφού έχει διαμορφωθεί από το πρόγραμμα διαμόρφωσης που είδαμε παραπάνω. Αυτό το πρόγραμμα εκτελεί διάφορους ελέγχους, κατασκευάζει έναν κατάλογο σύζήτησης και αντιγράφει το σωστό αρχείο `Registry.core` στην τοποθεσία `Registry/Registry`.

2.4 Αντικειμενική ανάλυση του WRF

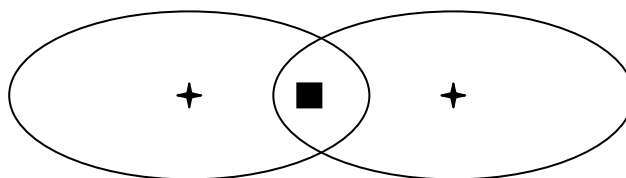
Ο στόχος της αντικειμενικής ανάλυσης των μετεωρολογικών μοντέλων, είναι να βελτιστοποιηθούν οι μετεωρολογικές αναλύσεις (η πρώτη εκτίμηση) στα πλέγματα μέσης κλίμακας, με την ενσωμάτωση των πληροφοριών από τις παρατηρήσεις. Παραδοσιακά, αυτές οι παρατηρήσεις είναι "άμεσες" παρατηρήσεις της θερμοκρασίας, της υγρασίας, του ανέμου και τα στοιχεία των ραδιοβολίσεων. Καθώς αναπτύσσονται νέες τεχνικές τηλεπισκόπησης, οι "έμμεσες" παρατηρήσεις εφαρμόζονται ολοένα και περισσότερο από τους ερευνητές. Για να είναι αποτελεσματική η χρήση αυτών των έμμεσων παρατηρήσεων για την αντικειμενική ανάλυση, απαιτείται προσοχή. Οι μέθοδοι που υιοθετούνται συνήθως για την έμμεση παρατήρηση, περιλαμβάνουν τις τρισδιάστατες και τεσσάρων διαστάσεων τεχνικές παραλλαγής (3DVAR και 4DVAR αντίστοιχα), οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τις άμεσες παρατηρήσεις.

Το WRF χρησιμοποιεί το πρότυπο Gressman (1959). Στο πρότυπο αυτό ορίζεται γύρω από κάθε παρατήρηση ένας κύκλος με ακτίνα επιρροής R και στο κέντρο του τοποθετείται το σημείο της παρατήρησης. Έτσι κάθε σημείο πλέγματος βρίσκεται μέσα σε κύκλους παρατηρήσεων. Στην συνέχεια δίνεται η πρώτη εκτίμηση του κάθε σημείου πλέγματος και συγκρίνεται με τις τιμές των παρατηρήσεων των κύκλων. Τελικά εξάγεται ένας μέσος όρος μεταξύ των παρατηρηθέντων και των προγνωστικών τιμών και τα αποτελέσματα είναι αρκετά εύστοχα.



Σχήμα 8. Με αστεράκι απεικονίζονται τα σημεία των παρατηρήσεων και οι κύκλοι επιρροής που ορίζουν. Με τετράγωνο απεικονίζεται το σημείο πλέγματος που όπως φαίνεται περικλείεται από δύο κύκλους. Αυτό είναι το βασικό πρότυπο Gressman.

Για την ανάλυση του ισχυρού ανέμου και της σχετικής υγρασίας, οι κύκλοι μετασχηματίζονται σε ελλείψεις (Ellipse Scheme) με διεύθυνση παράλληλη προς την κύρια ροή του ανέμου. Εάν η διεύθυνση ροής του ισχυρού αέρα είναι κεκλιμένη, τότε οι ελλείψεις παίρνουν σχήμα μπανάνας (Banana Scheme).



Σχήμα 9. Με αστεράκι απεικονίζονται τα σημεία των παρατηρήσεων και οι ελλείψεις επιρροής που ορίζουν. Με τετράγωνο απεικονίζεται το σημείο πλέγματος που όπως

φαίνεται περικλείεται από δύο κύκλους. Αυτό είναι το ελλειψοειδές πρότυπο Gressman.

2.5 Έργαλεία απεικόνισης (Post-Processing Utilities) του WRF

Υπάρχουν διαθέσιμα, διάφορα εργαλεία για την απεικόνιση των δεδομένων του μοντέλου WRF-ARW. Μέχρι σήμερα υποστηρίζονται τα ακόλουθα εργαλεία απεικόνισης: NCL, RIP4, ARWpost (μετατροπéας σε GrADS και Vis5D), WPP και VAPOR.

Τα δεδομένα του μοντέλου σε μορφή netCDF (Network Common Data Form), μπορούν ουσιαστικά να απεικονιστούν χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε κατάλληλο εργαλείο για αυτή τη μορφή δεδομένων.

Τα NCL, RIP4 και VAPOR μπορούν να διαβάσουν μόνο τα δεδομένα σε μορφή netCDF, καθώς το ARWpost μπορεί να διαβάσει δεδομένα σε μορφή netCDF και GRIB1 και το WPP μπορεί να διαβάσει δεδομένα σε netCDF και δυαδική μορφή.

2.6 Τοποθέτηση αρχικών τιμών στο WRF (WRF Initialization)

Οι δυο μεγάλες κατηγορίες προσομοιώσεων του WRF είναι σε θέση να παράγουν ιδεατές συνθήκες και δεδομένα που βασίζονται σε πραγματικές μετρήσεις. Οι ιδεατές προσομοιώσεις κατασκευάζουν ένα αρχείο με τις αρχικές συνθήκες από προϋπάρχοντα μονοδιάστατα ή δυσδιάστατα δεδομένα ραδιοβολίσεων και απλουστεύουν την ορογραφία. Τα δεδομένα που βασίζονται σε πραγματικές μετρήσεις συνήθως απαιτούν μια προεπεξεργασία από το σύστημα WPS η οποία παρέχεται για κάθε ατμοσφαιρικό και στατικό πεδίο με την κατάλληλη ακρίβεια για την επιλεγμένη ανάλυση του μοντέλου. Το εκτελέσιμο (.exe) αρχείο του WRF δεν αλλάζει από την επιλογή της πραγματοποίησης προσομοιώσεων με πραγματικά ή ιδεατά δεδομένα όμως τα προγράμματα προεπεξεργασίας των δεδομένων (real.exe, ideal.exe) είναι ειδικά σχεδιασμένα να λειτουργούν σύμφωνα με τις επιλογές του χρήστη. Σε όλες τις περιπτώσεις το μοντέλο κάνει τις εξής ενέργειες:

- υπολογίζει την κύρια κατάσταση του γεωδυναμικού ύψους και της στήλης πίεσης.

- Υπολογίζει τις διαταραχές από την κύρια κατάσταση του γεωδυναμικού ύψους και της στήλης πίεσης
- Τοποθετεί τις μετεωρολογικές μεταβλητές: u, v, την δυνητική θερμοκρασία και την αναλογία της αναμεμιγμένης υγρασίας
- Καθορίζει την κάθετη συντεταγμένη
- Παρεμβάλει τα στοιχεία στην κάθετη συντεταγμένη του μοντέλου
- Αρχικοποιεί στατικά πεδία για την προβολή του χάρτη και την επιφάνεια του εδάφους. Σε πολλές απ' τις ιδεατές περιπτώσεις γίνονται πολύ απλοποιημένες αρχικοποιήσεις όπως για παράδειγμα το ύψος της τοπογραφίας να είναι μηδέν.

Τα προγράμματα real.exe και ideal.exe μοιράζονται μια μεγάλη μερίδα του πηγαίου κώδικα για να διαχειριστούν τα ακόλουθα καθήκοντα:

- Διαβάζουν τα δεδομένα από την namelist
- Κατανέμουν τον χώρο για την ζητούμενη περιοχή, με τις μεταβολές που διευκρινίζονται στον χρόνο εκτέλεσης του μοντέλου
- Δημιουργούν ένα αρχείο για τις αρχικές συνθήκες

Το πρόγραμμα των πραγματικών δεδομένων (real.exe) κάνει κάποιες επιπρόσθετες επεξεργασίες:

- Διαβάζει τα μετεωρολογικά και στατικά δεδομένα που εισάγονται από το σύστημα προεπεξεργασίας (WPS).
- Προετοιμάζει τα πεδία που αφορούν το έδαφος για να χρησιμοποιηθούν από το μοντέλο (συνήθως κάθετη παρεμβολή στα απαιτούμενα επίπεδα για την διευκρινισμένη επιφάνεια του εδάφους).
- Ελέγχει τις εδαφολογικές κατηγορίες, την χρήση του εδάφους, την θερμοκρασία του εδάφους, την θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας που αλληλοσυνδέονται μεταξύ τους
- Υποβάλλει τις πολλαπλές χρονικές περιόδους εισαγωγής δεδομένων, σε επεξεργασία, για να παράγει τις πλευρικές οριακές συνθήκες που απαιτούνται στις περιοχικές και μέσης κλίμακας προγνώσεις

- Συνδέει τα τρισδιάστατα οριακά δεδομένα (u , v , την δυνητική θερμοκρασία, την αναλογία της αναμεμιγμένης υγρασίας και το συνολικό γεωδυναμικό ύψος) με την συνολική στήλη πίεσης

2.7 Σύστημα απόκλισης WRF (Variational - WRF VAR)

Η αφομοίωση στοιχείων είναι μια τεχνική με την οποία οι παρατηρήσεις συνδυάζονται με ένα προϊόν αριθμητικής πρόγνωσης και με τις αντίστοιχες στατιστικές λάθους, για να παρέχουν μια βελτιωμένη εκτίμηση της κατάστασης της ατμόσφαιρας. Οι διαφορές ανάμεσα στην ανάλυση και στην αριθμητική πρόγνωση, εξαρτώνται από το παρατηρούμενο λάθος τους. Η διαφορά ανάμεσα στο τριών διαστάσεων και το τεσσάρων διαστάσεων σύστημα αφομοίωσης είναι η χρήση ενός αριθμητικού μοντέλου πρόγνωσης στο δεύτερο.

Το τμήμα Μικρής και Μέσης Κλίμακας (MMM), που ανήκει στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας της Ατμόσφαιρας (NCAR), υποστηρίζει ένα ενοποιημένο (παγκόσμιο/περιοχικό, 3/4 D Var) σύστημα VAR (WRF-Var) για χρήση από το προσωπικό και τους συνεργάτες του Εθνικού Κέντρου Έρευνας της Ατμόσφαιρας (NCAR), το οποίο είναι ελεύθερο για όλους τους πολίτες, μαζί με περαιτέρω τεκμηρίωση, αποτελέσματα πειραμάτων, σχέδια κ.λ.π, από την διαδικτυακή σελίδα του WRF-Var.

Το σύστημα WRF-Var απαιτεί τρία αρχεία εισαγωγής για να μπορεί να εκτελεστεί: α) Ένα μορφοποιημένο αρχείο πρώτης εικασίας που προέρχεται είτε από το WPS/πραγματικό (ψυχρή-έναρξη) είτε από το WRF (θερμή-έναρξη), β) Παρατηρήσεις (σε μορφή ASCII ή PREBUFR) και γ) Ένα αρχείο με την στατιστική λαθών (περιέχοντας ένα υπόβαθρο της διακύμανσης του λάθους, που υπολογίζεται μέσω της μεθόδου NMC), χρησιμοποιώντας το “gen_be” εργαλείο του WRF-Var. Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τα παραπάνω:

<i>Input Data</i>	<i>Format</i>	<i>Created By</i>
First Guess	NETCDF	WRF Pre-processing System (WPS) and real.exe or WRF
Observations	ASCII (PREPBUFR also possible)	Observation Preprocessor (OBSPROC)
Background Error Statistics	Binary	WRF-Var gen_be utility

Πίνακας 1. Περιγραφή των παραπάνω διαδικασιών. ARW User's Guide 2008

2.8 Η φυσικομαθηματική δομή του WRF

Για να αναπαραστήσει κανείς τον καιρό και να κάνει προσομοιώσεις με χονδροειδής αναλύσεις, απαιτείται ένα ελάχιστο σύνολο από φυσικά συστατικά όπως είναι η ακτινοβολία, το οριακό στρώμα, οι παραμετροποιήσεις του εδάφους, οι παραμετροποιήσεις της ανωμεταφοράς, ο στροβιλισμός, και η μικροφυσική.

Δεδομένου ότι το WRF αναπτύχθηκε και για ερευνητικές και για επιχειρησιακές χρήσεις, στο μοντέλο συμπεριλήφθηκαν τόσο πολύπλοκα όσο και απλουστευμένα σχέδια φυσικής. Οι στόχοι της ανάπτυξης της φυσικής του μοντέλου είναι να εφαρμοστεί ένα βασικό σύνολο φυσικής και να σχεδιαστεί μια φιλική προς τον χρήστη επαφή με την φυσική. Από την στιγμή που το WRF χρησιμοποιείται για αναλύσεις 1-10 χλμ, είναι επόμενο μερικές από τις φυσικές διεργασίες να μην δουλεύουν ικανοποιητικά σε τόσο υψηλές αναλύσεις (π.χ. παραμετροποίηση σωρειτών).

Το WRF προσφέρει μια ποικιλία επιλογών για την φυσική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και να συνδυαστεί με κάθε τρόπο. Οι επιλογές κυμαίνονται από απλές και αποτελεσματικές μέχρι πολύπλοκες και πιο δαπανηρές υπολογιστικά και από πρόσφατα ανεπτυγμένα σχέδια μέχρι παλιά και δοκιμασμένα σχέδια.

Παρακάτω θα περιγράψουμε τις επιλογές που είναι διαθέσιμες στην έκδοση 3 του μοντέλου.

2.8.1 Μικροφυσική (mp_physics)

- i. Σχέδιο Kessler: Θερμή βροχή (δηλαδή χωρίς καθόλου πάγο) που χρησιμοποιείται συνήθως στις εξιδανικευμένες μελέτες των νεφών
- ii. Σχέδιο Lin et al.: Ένα πολύπλοκο σχέδιο που χειρίζεται τον πάγο, το χιόνι και τους κόκκους χιονιού, κατάλληλο για προσομοιώσεις υψηλής ανάλυσης πραγματικών δεδομένων.
- iii. Σχέδιο WRF Single-Moment 3-class: Ένα απλό αποδοτικό σχέδιο με τις διαδικασίες του πάγου και του χιονιού, κατάλληλο για μέσης κλίμακας αναλύσεις.
- iv. Σχέδιο WRF Single-Moment 5-class: Μια ελαφρώς πιο πολύπλοκη έκδοση από την προηγούμενη, που χειρίζεται τις διαδικασίες ανάμειξης και το υπερψυγμένο νερό.
- v. Μικροφυσική ETA: Ένα απλό αποδοτικό σχέδιο που χειρίζεται τις διαδικασίες ανάμειξης. Χρησιμοποιείται στα επιχειρησιακά μοντέλα του Εθνικού Κέντρου Περιβαλλοντικών Προβλέψεων (NCEP).
- vi. WRF Single-Moment 6-class scheme: Ένα σχέδιο για τον πάγο, το χιόνι και τους κόκκους χιονιού, κατάλληλο για υψηλής κλίμακας αναλύσεις.
- vii. Σχέδιο μικροφυσικής Goddard: Ένα σχέδιο για τον πάγο, το χιόνι και τους κόκκους χιονιού κατάλληλο για προσομοιώσεις υψηλής ανάλυσης.
- viii. Σχέδιο Thompson et al.: Ένα νέο σχέδιο για τον πάγο, το χιόνι και τους κόκκους χιονιού κατάλληλο για προσομοιώσεις υψηλής ανάλυσης.
- ix. Σχέδιο Morrison double-moment: Ένα σχέδιο για τον πάγο, το χιόνι, την βροχή και τους κόκκους χιονιού για προσομοιώσεις των νεφών.

2.8.2 Ακτινοβολία Μεγάλου Κύματος (ra_lw_physics)

- i. Σχέδιο RRTM: Μοντέλο για την ραγδαία μεταφορά της ακτινοβολίας. Ένα ακριβές σχέδιο που χρησιμοποιεί τους πίνακες look-up για καλύτερη αποδοτικότητα.
- ii. Σχέδιο GFDL: Επιχειρησιακό σχέδιο για την ακτινοβολία του μοντέλου ETA. Ένα παλαιότερο σχέδιο πολλαπλής ζώνης με την επίδραση του διοξειδίου του άνθρακα, του όζοντος και της μικροφυσικής.

- iii. Σχέδιο CAM: Από το CAM3 κλιματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στο CCSM. Κατάλληλο για τα αερολύματα και τα ίχνη των αερίων.

2.8.3 Ακτινοβολία μικρού κύματος (ra_sw_physics)

- i. Σχέδιο Dudhia: Απλή ολοκλήρωση προς τα κάτω που επιτρέπει αποτελεσματικά την απορρόφηση από τον καθαρό ουρανό, τα σύννεφα και τα διάσπαρτα νέφη.
- ii. Σχέδιο Goddard: Σχέδιο πολλαπλής ζώνης και δύο ρευμάτων. Υπολογίζει το όζον με την επιρροή της κλιματολογίας και των νεφών.
- iii. Σχέδιο GFDL: Σχέδιο που χρησιμοποιείται επιχειρησιακά στο ETA. Ένα σχέδιο πολλαπλής ζώνης και δύο ρευμάτων που υπολογίζει το όζον με την επιρροή της κλιματολογίας και των νεφών.
- iv. Σχέδιο CAM: Από το κλιματικό μοντέλο CAM3 που χρησιμοποιείται στο CCSM. Κατάλληλο για τα αερολύματα και τα ίχνη των αερίων.

2.8.4 Επιφανειακό στρώμα (sf_sfclay_physics)

- i. Παρόμοιο πρότυπο με του μοντέλου MM5: Βασίζεται στο Monin-Obukhov με το ιξώδες υπόστρωμα Carlson-Boland και τις τυποποιημένες λειτουργίες των πινάκων look-up.
- ii. Παρόμοιο πρότυπο με του μοντέλου ETA: Χρησιμοποιείται από στο μοντέλο ETA. Βασίζεται στο Monin-Obukhov με το μήκος της θερμικής ταχύτητας Zilitinkevich και τις τυποποιημένες λειτουργίες των πινάκων look-up.
- iii. Επιφανειακό στρώμα Pleim-Xiu: Νέο στην έκδοση 3.0

2.8.5 Επιφάνεια του εδάφους (sf_surface_physics)

- i. Θερμική διάχυση 5 στρωμάτων: Σχέδιο της θερμοκρασίας του εδάφους, που χρησιμοποιεί πέντε στρώματα.
- ii. Μοντέλο Noah Land Surface: Ενοποιημένο σχέδιο NCEP/NCAR/AFWA με την θερμοκρασία και την υγρασία του εδάφους να προβάλλονται σε 4

στρώματα, λαμβάνοντας υπόψη την κάλυψη του χιονιού και την φυσική για το παγωμένο έδαφος.

- iii. Μοντέλο RUC Land Surface: Το επιχειρησιακό σχέδιο RUC με την θερμοκρασία και την υγρασία του εδάφους να προβάλλονται σε 6 στρώματα, λαμβάνοντας υπόψη για πολλαπλά στρώματα την φυσική του χιονιού και του παγωμένου εδάφους.
- iv. Μοντέλο Pleim-Xiu Land Surface: Σχέδιο δύο στρωμάτων για τη βλάστηση.

2.8.6 Πλανητικό οριακό στρώμα (bl_pbl_physics)

- i. Πρότυπο Πανεπιστημίου Yonsei: Μη-τοπικό-K πρότυπο, με στρώμα παράσυρσης και παραβολικό προφίλ K στο ασταθές αναμεμιγμένο στρώμα.
- ii. Σχέδιο Mellor-Yamada-Janjic: Επιχειρησιακό σχέδιο ETA. Μονοδιάστατο σχέδιο πρόγνωσης της τυρβώδους κινηματικής ενέργειας με τοπική κατακόρυφη κίνηση.
- iii. Σχέδιο MRF: Αυτό το σχέδιο χρησιμοποιεί την αποκαλούμενη αντίθετης-κλίσης ροή, για την θερμότητα και την υγρασία στις ασταθείς συνθήκες. Χρησιμοποιεί τους ενισχυμένους κάθετους συντελεστές ροής στο πλανητικό οριακό στρώμα και το ύψος του στρώματος καθορίζεται από έναν κρίσιμο αριθμό Richardson. Χειρίζεται την κάθετη διάχυση με ένα ενδεχόμενο τοπικό σχήμα και βασίζεται στο τοπικό Ri στην ελεύθερη ατμόσφαιρα.
- iv. ACM2 PBL: Ασύμμετρο Μοντέλο Ανωμεταφοράς με μη τοπική ανοδική κίνηση και τοπική καθοδική κίνηση. Νέο στην έκδοση 3.0
- v. LES PBL: Ένα μεγάλης προσομοίωσης στροβίλου οριακό στρώμα. Διαθέσιμο στην έκδοση 3.0.

2.8.7 Παραμετροποίηση Σωρειτών (cu_physics)

- i. Σχέδιο Kain-Fritsch: Βαθύ και ρηχό σχέδιο ανωμεταφοράς σε υποπλέγμα που χρησιμοποιεί μια προσέγγιση της ροής της μάζας με τις καθοδικές κινήσεις και την αστάθεια σε μεταβαλλόμενες χρονικές κλίμακες.
- ii. Σχέδιο Betts-Miller-Janjic: Επιχειρησιακό σχέδιο ETA. . Πρότυπο υγρής στήλης αέρα που αναπτύσσεται κατά μήκος ενός καλά αναμεμιγμένου προφίλ.

- iii. Σχέδιο στοχαστικής πρόγνωσης Grell-Devenyi: Πολλών παραμέτρων μέθοδος στοχαστικής πρόγνωσης με 144 μέλη υποπλέγματος.
- iv. Τρισδιάστατο Σχέδιο στοχαστικής πρόγνωσης σωρειτών Grell: Σχέδιο για υψηλότερη ανάλυση που επιτρέπει την υποχώρηση των γειτονικών στηλών.

2.9 Επιλογές διάχυσης και απόσβεσης

Η διάχυση στο WRF είναι κατηγοριοποιημένη κάτω από δύο παραμέτρους, την επιλογή διάχυσης και την επιλογή K. Η επιλογή διάχυσης επιλέγει πως υπολογίζονται οι παράγωγοι που χρησιμοποιούνται στην διάχυση και η επιλογή K επιλέγει πως υπολογίζονται οι συντελεστές K. Σημειώστε ότι όταν επιλέγετε μια επιλογή πλανητικού οριακού στρώματος, η κατακόρυφη διάχυση γίνεται από το σχέδιο πλανητικού οριακού στρώματος και όχι από το σχέδιο διάχυσης. Στην έκδοση 3, η κατακόρυφη διάχυση συνδέεται επίσης με τις ροές επιφάνειας.

2.9.1 Επιλογές διάχυσης (diff_opt)

- i. Απλή διάχυση: Οι κλίσεις λαμβάνονται απλά κατά μήκος των συντεταγμένων.
- ii. Πλήρης διάχυση: Οι κλίσεις χρησιμοποιούν μετρικούς όρους για να υπολογίσουν ακριβέστερα τις οριζόντιες κλίσεις στις επικλινείς συντεταγμένες.

Επιλογή K (km_opt)

Σημειώστε ότι όταν χρησιμοποιείται το σχέδιο πλανητικού οριακού στρώματος, μόνο οι παρακάτω επιλογές (a) και (d) έχουν νόημα γιατί οι (b) και (c) είναι σχεδιασμένες για τρισδιάστατη διάχυση.

- i. Σταθερά: Το K καθορίζεται από τις τιμές της namelist για την οριζόντια και κατακόρυφη διάχυση.
- ii. Τριών διαστάσεων TKE: Όταν χρησιμοποιείται μια προγνωστική εξίσωση για την τυρβώδη κινηματική ενέργεια, το K βασίζεται στο TKE.
- iii. Τριών διαστάσεων Παραμόρφωση: Το K εντοπίζεται από την τρισδιάστατη παραμόρφωση και τη σταθερότητα, έπειτα από μια προσέγγιση Smagorinsky.

- iv. Δυσδιάστατη Παραμόρφωση: Το K για την οριζόντια διάχυση εντοπίζεται από την οριζόντια παραμόρφωση. Η κάθετη διάχυση έχει ήδη υπολογιστεί από το σχέδιο πλανητικού οριακού στρώματος.

6^{ου} Βαθμού Οριζόντια Διάχυση (diff_6th_opt)

Η 6ου βαθμού οριζόντια υπερβολική διάχυση ενεργεί σε όλες τις μεταβλητές σαν εκλεκτικό, μικρού κύματος, αριθμητικό φίλτρο θορύβου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί από κοινού με το diff_opt=1: απλός και =2: θετικός καθορισμένος.

2.9.2 Επιλογές απόσβεσης

Αυτές είναι ανεξάρτητα ενεργοποιημένες επιλογές.

- i. Ανώτερη Απόσβεση: Ένα στρώμα αυξανόμενης διάχυσης, ή ένα στρώμα Rayleigh, ή ένα στρώμα βαρυτικών κυμάτων μπορεί να προστεθεί κοντά στην κορυφή του μοντέλου για τον έλεγχο της ανάκλασης από το ανώτερο όριο.
- ii. Κατακόρυφη ταχύτητα Απόσβεσης: Για την λειτουργική ορθότητα, η κάθετη κίνηση μπορεί να μετριαστεί για να αποτρέψει την αποσταθεροποίηση του μοντέλου με τις τοπικά μεγάλες κατακόρυφες ταχύτητες. Αυτό έχει επιπτώσεις μόνο στους ισχυρούς ανοδικούς πυρήνες κι έτσι ασκεί πολύ μικρή επίδραση στα αποτελέσματα.
- iii. Απόκλιση Απόσβεσης (sm_div): Ελέγχει την οριζόντια διάδοση των ηχητικών κυμάτων.
- iv. Εξωτερική Απόσβεση (em_div): Ελέγχει τα κύματα της ανώτερης επιφάνειας.
- v. Time Off-centering (epssm): Ελέγχει την κατακόρυφη διάδοση των ηχητικών κυμάτων.

2.10 Επιλογές Μετατόπισης

- i. Οι οριζόντιες μετατοπίσεις της ορμής (h_mom_adv_order) και scalar (h_sca_adv_order) μπορούν να είναι 2ου, 6ου και 5ου βαθμού που είναι και οι προτεινόμενες.
- ii. Οι κάθετες μετατοπίσεις της ορμής (v_mom_adv_order) και scalar (v_sca_adv_order) μπορούν να είναι 2ου, 6ου και 3ου βαθμού που είναι και οι προτεινόμενες.

- iii. Η θετικά καθορισμένη επιλογή μετατόπισης, μπορεί να εφαρμοστεί στην υγρασία (pd_moist= .true.), στο scalar (pd_scalar), στις χημικές μεταβλητές (pd_chem) και στο TKE (pd_tke).

2.11 Άλλες Δυναμικές Επιλογές

- i. Το μοντέλο μπορεί να τρέξει υδροστατικά με την αλλαγή της επιλογής non_hydrostatic σε false.
- ii. Ο όρος Coriolis μπορεί να εφαρμοστεί στην διαταραχή του ανέμου (pert_coriolis = .true.).
- iii. Για το diff_opt=2 μόνο, η κατακόρυφη διάχυση μπορεί να δράσει σε πλήρη πεδία.

2.12 Επιλογές Συνθηκών των Πλευρικών Ορίων

- i. Περιοδικός (periodic_x / periodic_y): για τις ιδεατές περιπτώσεις.
- ii. Ανοιχτός (open_xs, open_xe, open_ys, open_ye): για τις ιδεατές περιπτώσεις.
- iii. Συμμετρικός (symmetric_xs, symmetric_xe, symmetric_ys, symmetric_ye): για τις ιδεατές περιπτώσεις.
- iv. Καθορισμένος: για τις περιπτώσεις των πραγματικών δεδομένων. Η πρώτη σειρά και στήλη καθορίζονται με τις τιμές του εξωτερικού μοντέλου (spec_zone =1, και αυτό δεν πρέπει να αλλάξει). Οι σειρές και στήλες στην relax_zone έχουν τιμές συνδυασμένες από το εξωτερικό μοντέλο και το WRF. Οι τιμές στην relax_zone μπορούν να αλλάξουν εφόσον spec_bdy_width = spec_zone + relax_zone. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν με το periodic_x σε προσομοιώσεις τροπικών καναλιών.
- v. Nested (nested): για πραγματικές και ιδεατές περιπτώσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Εφαρμογές του WRF

3.1 Πεδία Εφαρμογών

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τόσο το WRF-ARW όσο και το WRF-NMM, έχουν σημαντική εφαρμογή σε πολλά πεδία όπως η επιχειρησιακή αριθμητική πρόγνωση, η έρευνα παραμετροποιήσεων, η προγνωστική έρευνα, εφαρμογή για διδακτικούς σκοπούς, σε σύζευξη με άλλα μοντέλα και όλα αυτά σε περιοχική ή παγκόσμια κλίμακα. Παρακάτω θα δούμε μερικά παραδείγματα εφαρμογών, που εστιάζονται στην πρόγνωση τυφώνων και τροπικών καταιγίδων, στην πρόγνωση της διασποράς ρύπων σε αστικές κυρίως περιοχές, στην εποχιακή πρόγνωση του υετού και στην εκτίμηση του καιρού σε άλλους πλανήτες.

3.1.1 Πρόγνωση τυφώνων

Μελέτη τεσσάρων τυφώνων στην Αμερική (2005)

Το 2005 στην Αμερική, έγινε μελέτη τεσσάρων τυφώνων που κινήθηκαν από τον Ατλαντικό προς την στεριά, με την βοήθεια του μοντέλου WRF-ARW. Οι τυφώνες που μελετήθηκαν ήταν ο Κατρίνα, ο Βίλμα, ο Οφέλια και ο τυφώνας Ρήτα.

Το μοντέλο ARW χρησιμοποίησε μια αμφίδρομη διαμόρφωση κελιών (Michalakes et al. 2005) που χαρακτηρίζετε από μια εξωτερική περιοχή 12χλμ και από ένα κινητό διάστημα κελιών 4χλμ.

Στην περιοχή των 12χλμ χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο των Kain-Fritsch για την παραμετροποίηση των σωρειτών αλλά στις περιοχές με την υψηλότερη ανάλυση δεν υπήρχε καμιά παραμετροποίηση. Οι δύο περιοχές χρησιμοποίησαν το πρότυπο μικροφυσικής single-moment 3-class (WSM3) (Hong et al. 2004). Και οι δύο περιοχές χρησιμοποίησαν επίσης το πρότυπο του Πανεπιστημίου Yonsei (Noh et al. 2003) για το πλανητικό οριακό στρώμα. Για τον συντελεστή υγρασίας στο έδαφος χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο Carlson and Boland (1978).

Οι προγνώσεις παράγονταν στις 0000 UTC και περιστασιακά στις 1200 UTC. Εισάγονταν αρχικές τιμές από το μοντέλο GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory), ενώ όταν αυτό το μοντέλο δεν ήταν διαθέσιμο, εισήγαγαν τις αρχικές συνθήκες από το παγκόσμιο μοντέλο GFS (Global Forecast System).

Το μοντέλο WRF-ARW γενικά αποδείχθηκε ανταγωνιστικό και κάποιες φορές ανώτερο από άλλα επιχειρησιακά μοντέλα, όσον αφορά την πρόγνωση της θέσης και την ένταση της θύελλας. Μελλοντικές εργασίες θα εκτιμήσουν καλύτερα τα οφέλη της χρήσης πλεγμάτων με απόσταση 1-2χλμ, που καλύπτουν τον εσωτερικό πυρήνα.

Μελέτη του τυφώνα Nida, Ταϊβάν 2004

Μια ομάδα ερευνητών στην Ταϊβάν μελέτησαν την συμπεριφορά της στοχαστικής πρόγνωσης των μοντέλων MM5 και WRF κατά την διάρκεια της βροχερής περιόδου Μεί-γυ ,από τις 15 Μαΐου έως τις 20 Ιουνίου του έτους 2004. Ιδιαίτερα μελετήθηκε η προγνωστική ικανότητα των δύο μοντέλων στον τυφώνα Nida, που έπληξε τις ανατολικές ακτές της Ταϊβάν από τις 17 έως τις 20 Μαΐου 2004. Τα μοντέλα εκτελούνταν στις 0000 UTC και στις 1200 UTC και έκαναν πρόγνωση για 48 ώρες.

Τα αποτελέσματα και των δύο μοντέλων ήταν ικανοποιητικά αν και το καθένα έδειξε κάποιες ευαισθησίες. Όσον αφορά το WRF, υποεκτίμησε τον μέσης κλίμακας υετό που οφείλεται στις ανοδικές κινήσεις του αέρα (αστάθεια) και σύμφωνα με τους Chien and Jou (2004) αυτό οφείλεται στο πρότυπο Kain-Fritsch που χρησιμοποιήθηκε ενώ κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι το πρότυπο Grell θα έφερνε καλύτερα αποτελέσματα στην πρόγνωση του υετού.

Ο παρακάτω πίνακας απεικονίζει το σφάλμα πρόβλεψης της πορείας του τυφώνα σε χιλιόμετρα, από τα δύο μοντέλα. Παρατηρούμε ότι στις 0 ώρες το σφάλμα είναι ίδιο, στις 12 ώρες το σφάλμα του WRF είναι μεγαλύτερο, στις 24 ώρες είναι ίδιο, στις 36 ώρες το σφάλμα του MM5 είναι μεγαλύτερο και στις 48 ώρες το σφάλμα του MM5 είναι μεγαλύτερο κατά 40 χιλιόμετρα.

	0h	12h	24h	36h	48h
WRF	38	155	158	164	191
MM5	38	130	158	190	231

Πίνακας 2. Ο παραπάνω πίνακας απεικονίζει το μέσο σφάλμα (km) των μοντέλων MM5 και WRF, στην πρόγνωση της πορείας του τυφώνα Nida (2004).

Τυφώνες Isabel, Frances, Ivan

Το μοντέλο WRF χρησιμοποιήθηκε πειραματικά και για την πρόγνωση των τυφώνων Isabel (2003), Frances (2004), και Ivan (2004) όπου και χρησιμοποίησε δύο διαμορφώσεις. Η πρώτη είχε ανάλυση 10 ή 12 χιλιομέτρων, και χρησιμοποιήθηκε για πρόγνωση πέντε ημερών. Η δεύτερη είχε ανάλυση τεσσάρων χιλιομέτρων και χρησιμοποιήθηκε για να προβλέψει την ένταση των τυφώνων. Το μοντέλο έπαιρνε αρχικές τιμές από το παγκόσμιο μοντέλο GFS με ανάλυση μίας μοίρας (111 χλμ). Για το πλανητικό οριακό στρώμα χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο του Yonsei University, για την παραμετροποίηση σωρειτών χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο Kain-Fritsch, για την ακτινοβολία τα πρότυπα Dudhia και RRTM ενώ τέλος για την μικροφυσική του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν τα πρότυπα Lin et al και το WRF Single-Moment 3-class.

Στον πίνακα παρακάτω παρατηρούμε το σφάλμα στην πρόγνωση της πορείας του τυφώνα Isabel (2003) αλλά και την απόκλιση της προβλεπόμενης βαρομετρικής πίεσης στο κέντρο αυτού, από την παρατηρούμενη.

	5 hr	17 hr	29 hr	41 hr
Track error (km)	~8	~12	~8	~8
SLP error (mb)	958 (+1)	958 (+1)	952 (-5)	949 (-8)

Πίνακας 3. Απεικονίζονται το σφάλμα της πρόγνωσης της πορείας του τυφώνα Isabel (2003) καθώς και το σφάλμα της εκτίμησης της βαρομετρικής πίεσης στο κέντρο αυτού (Mesoscale & Microscale Meteorological Division / NCAR)

Όσον αφορά κάποια πειράματα που έγιναν πάνω στην μικροφυσική του μοντέλου συγκρίνοντας τα πρότυπα Lin, WRF Single-Moment 3-class και WRF Single-Moment 6-class, αποδείχθηκε ότι η καλύτερη πρόγνωση των ανέμων και σε βάθος χρόνου γίνεται με την χρήση του προτύπου Lin.

Τέλος από την συγκεκριμένη μελέτη αποδεικνύεται ότι το μοντέλο WRF είναι ικανό να προβλέψει σωστά την πορεία και την δομή των τυφώνων.

Σύγκριση του WRF-ARW με άλλα επιχειρησιακά μοντέλα (2005)

Το έτος 2005 χαρακτηρίστηκε από αρκετά μεγάλο αριθμό τροπικών καταιγίδων στον Ατλαντικό, που συγκεκριμένα έφτασαν τις 30. Αυτό έδωσε την ευκαιρία στους μελετητές, να πειραματιστούν με το σχετικά νέο τότε WRF, κι έτσι το χρησιμοποίησαν για προγνώσεις κατά τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο. Τέθηκε σε ισχύ το WRF-ARW Έκδοση 2.1.0 στο οποίο εφαρμόστηκαν δύο διαμορφώσεις. Η πρώτη είχε ανάλυση 12 χιλιομέτρων και έκανε πρόγνωση πέντε ημερών καλύπτοντας συνολικά 5500 km². Στην διαμόρφωση αυτή χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο Kain-Fritsch για την παραμετροποίηση σωρειτών, το RRTM για την μεγάλου μήκους ακτινοβολία, και το MM5-Dudhia για την μικρού μήκους ακτινοβολία. Στην δεύτερη διαμόρφωση με ανάλυση 12 και 4 χιλιομέτρων, χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια πρότυπα με την διαφορά ότι δεν χρησιμοποιήθηκε κανένα πρότυπο για την παραμετροποίηση των σωρειτών. Αρχικές συνθήκες εισάγονταν από το μοντέλο GFDL ή το GFS.

Μετά την εφαρμογή του ARW και την σύγκρισή του με τις παρατηρούμενες συνθήκες αλλά και με άλλα επιχειρησιακά μοντέλα (GFDL, NOGAPS, UKMO, GFS και το FSSE), διαπιστώθηκε ότι για την τρίτη έως πέμπτη προγνωστική ημέρα, το σφάλμα πρόγνωσης της πορείας των τυφώνων ήταν κατά μέσο όρο μικρότερο από τα άλλα μοντέλα.

Όσον αφορά την πρόγνωση του ανέμου στα 10μέτρα, το WRF-ARW με την ανάλυση 12 χιλιομέτρων, είχε παρόμοια σφάλματα με τα υπόλοιπα μοντέλα στις 12, 24 και 36 ώρες, ενώ στις 96 και 120 ώρες είχε τα μικρότερα σφάλματα.

Αντίστοιχα η εφαρμογή με την ανάλυση των τεσσάρων χιλιομέτρων, είχε παρόμοια σφάλματα με τα άλλα μοντέλα στις ώρες 12 με 48, ενώ στις 72 και 96 ώρες είχε τα καλύτερα αποτελέσματα.

Σε γενικές γραμμές είναι αποδεκτό ότι και οι δύο εφαρμογές του ARW είχαν καλύτερα αποτελέσματα από τα άλλα επιχειρησιακά μοντέλα από την τρίτη μέχρι την πέμπτη προγνωστική ημέρα ενώ αν συγκρίνουμε τις δύο εφαρμογές, αυτή των 4 χιλιομέτρων είχε καλύτερη προγνωσιμότητα στις 12 και 24 ώρες αλλά χειρότερη για τις επόμενες.

Τέλος οι ερευνητές πιστεύουν ότι η αδυναμία του μοντέλου τις τρεις πρώτες προγνωστικές ημέρες, οφείλεται στις μη ρεαλιστικές αρχικές συνθήκες που εισάγονταν από το GFDL ή το GFS.

Ολοκληρώνοντας αυτή τη μικρή παρουσίαση των εφαρμογών του μοντέλου πάνω στην πρόγνωση της πορείας, των ανέμων και της έντασης των τυφώνων, θα μπορούσαμε να πούμε ότι το μέλλον προδιαγράφεται ευόινο καθώς μπορούν να γίνουν πολλές βελτιώσεις με τον συνδυασμό του WRF με άλλα θαλάσσια μοντέλα καθώς και με την εφαρμογή κινούμενων κελιών που θα ακολουθούν την πορεία των τυφώνων.

3.1.2 Πρόγνωση διασποράς ρύπων

Διασπορά σωματιδίων στην πόλη Pune της Ινδίας

Το WRF χρησιμοποιήθηκε σε σύζευξη με το μοντέλο ποιότητας αέρα, Aermod (AMS/EPA Regulatory Model), για την εκτίμηση της διασποράς των βλαβερών σωματιδίων στην πόλη Pune της Ινδίας, η οποία αναλύθηκε σε ένα πλέγμα 2χλμ x 2χλμ. Κατόπιν ελέγχου των προβλεπόμενων και των πραγματικών τιμών της θερμοκρασίας, της έντασης και διεύθυνσης του ανέμου από το μοντέλο WRF, κρίθηκε να είναι κατάλληλο για σύζευξη με το Aermod. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα προγνωστικά μετεωρολογικά δεδομένα ήταν ασφαλή αλλά όσον αφορά την εκτίμηση συγκέντρωσης σωματιδίων, παρατηρήθηκε υποεκτίμηση. Επίσης παρατηρήθηκε μεγάλη συγκέντρωση στο κέντρο της πόλης σε σχέση με τα περίχωρα. Η λανθασμένη εκτίμηση πιθανώς να οφείλεται στους τοπικούς ανέμους που έπνεαν την περίοδο παρατηρήσεων.

Διασπορά καπνού σε δασικές πυρκαγιές (Αλάσκα)

Το WRF έχει χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της ρύπανσης της ατμόσφαιρας από τον καπνό και τα σωματίδια που αιωρούνται κατά την διάρκεια και μετά την λήξη μεγάλων δασικών πυρκαγιών. Έτσι το Πανεπιστήμιο της Αλάσκας σε συνεργασία με άλλα ερευνητικά κέντρα δημιούργησαν ένα πρόγραμμα (UAFSmoke) που προβλέπει την κίνηση του καπνού των πυρκαγιών.

Το πρόγραμμα αυτό εισάγει πληροφορίες από το μοντέλο WRF-Chem καθώς και από δορυφορικές εικόνες (MODIS). Επιπλέον χρησιμοποιούνται αρχικά μετεωρολογικά δεδομένα από το μοντέλο GFS (Global Forecast System) ενώ υπολογίζονται και οι βιογενείς και ανθρωπογενείς παράγοντες που προκαλούν τις φωτιές, με την επίλυση μιας ρουτίνας. Το WRF-Chem έχει αναγνωριστεί ως ιδανικό

εργαλείο για να ερευνήσει την διασπορά των ατμοσφαιρικών ρύπων όπως ο καπνός των πυρκαγιών, δεδομένου ότι προβλέπει το ίχνος των αερίων και την δυναμική των σωματιδίων επιτρέποντας την αλληλεπίδραση του καιρού και της χημείας. Το πρόγραμμα λειτουργεί από το 2008 και τα αποτελέσματά του δημοσιεύονται καθημερινά στο διαδύκτιο (<http://smoke.arsc.edu>).

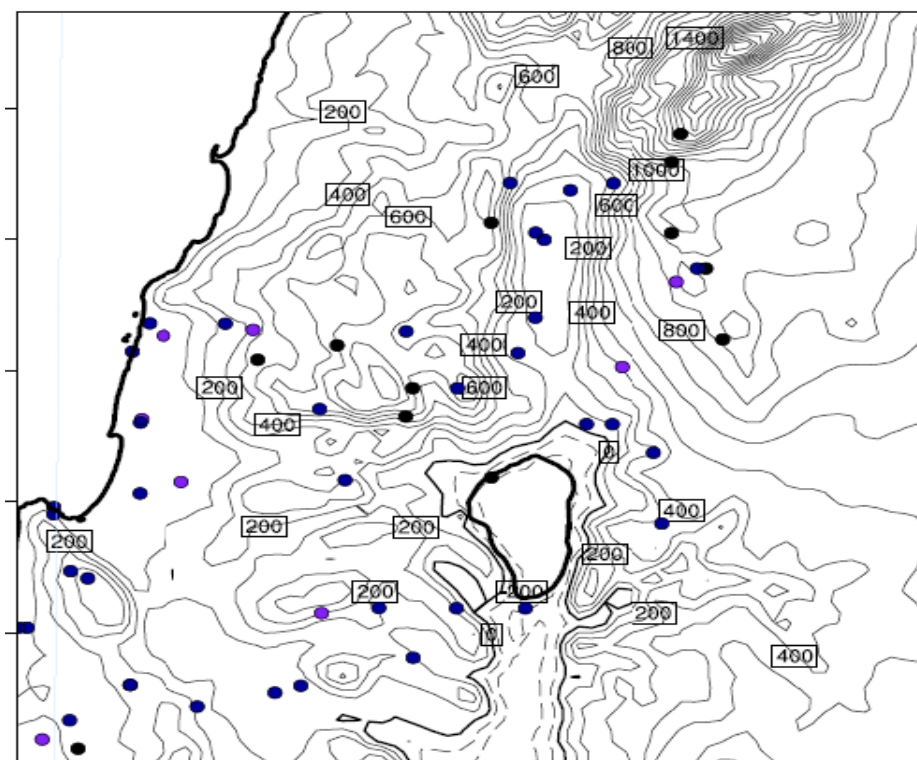
Διασπορά σωματιδίων σε αναστροφικές συνθήκες

Το WRF-Chem εφαρμόστηκε από το Πανεπιστήμιο της Αλάσκας και άλλους φορείς για την πρόγνωση μεταφοράς των επιβλαβών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά στην πρόβλεψη του ανέμου, της θερμοκρασίας στην επιφάνεια, του σημείου δρόσου και της σχετικής υγρασίας. Μερικές δυσκολίες εντοπίστηκαν στον προσδιορισμό των ισχυρών αναστροφών της θερμοκρασίας που στα εδάφη της Αλάσκας είναι αρκετά συχνές. Αυτές τις νύχτες που σημειώθηκε θερμοκρασιακή αναστροφή, παρατηρήθηκαν και οι μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ των προβλεπόμενων και των παρατηρούμενων ποσοτήτων σωματιδίων.

3.1.3 Εποχική πρόγνωση υετού

Η μελέτη της εποχιακής βροχόπτωσης στο Ισραήλ είναι δύσκολα προβλέψιμη εξαιτίας του ιδιόμορφου ανάγλυφου αλλά και της γεωγραφικής του θέσης στην οποία καταλήγουν πολλοί τροπικοί κυκλώνες.

Η παρούσα εργασία συνοψίζει τα αποτελέσματα των αναλύσεων που προκύπτουν από το μοντέλο WRF-FDDA σχετικά με την εποχιακή συνολική βροχόπτωση στις περιοχές που περιβάλλουν την λίμνη Galilee στο Ισραήλ. Η περίοδος που εξετάστηκε είναι από τις 10 Νοεμβρίου 2008 έως τις 22 Μαρτίου 2009. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το ιδιαίτερα έντονο ανάγλυφο της περιοχής.



Σχήμα 10. Ένα τμήμα του πεδίου υψηλής ανάλυσης (1.5 χλμ οριζόντια απόσταση των πλεγμάτων) που καλύπτει την λίμνη Galilee και τις περιβαλλόμενες περιοχές. Οι κλειστές καμπύλες αντιπροσωπεύουν τις ισοϋψείς με ισοδιάσταση 100μ. Οι χρωματισμένοι κύκλοι απεικονίζουν τις θέσεις των βροχόμετρων.

Στο WRF αφομοιώθηκαν δεδομένα από την επιφάνεια, την ανώτερη ατμόσφαιρα και μετρήσεις της έντασης του ανέμου, της θερμοκρασίας και της υγρασίας όπως αυτές καταγράφηκαν από τα αεροπλάνα. Εφαρμόστηκαν τέσσερα υπολογιστικά πεδία με οριζόντια απόσταση πλεγμάτων τα 40.5, 13.5, 4.5 και 1.5 χιλιόμετρα. Στην ευρύτερη περιοχή μελέτης τοποθετήθηκαν βροχόμετρα από τρεις οργανισμούς (Israel Hydrological Service, Israel Ministry of Agriculture, Israel Meteorological Service) για να είναι δυνατή η επαλήθευση των προγνώσεων και να μην εξαρτάται μόνο από τις εικόνες ραντάρ. Το WRF λάμβανε αρχικές και οριακές συνθήκες από το μοντέλο GFS, μία φορά την εβδομάδα.

Τα αποτελέσματα της επαλήθευσης δείχνουν ότι οι αναλύσεις του μοντέλου WRF-FDDA αναπαράγουν με ακρίβεια την χωρική κατανομή της βροχόπτωσης και τονίζουν την αναγκαιότητα εφαρμογής ενός μοντέλου υψηλής χωρικής ανάλυσης για τον υπολογισμό της εποχιακής βροχόπτωσης σε μια περιοχή με πλούσιο ανάγλυφο.

Τέλος, η σύγκριση των αναλύσεων του WRF με τα δεδομένα του ραντάρ, δείχνουν ότι οι αναλύσεις του μοντέλου απεικονίζουν ακριβέστερα την χωρική κατανομή της βροχόπτωσης που συνδέονται με διαφορετικά κυκλωνικά γεγονότα στην περιοχή μελέτης.

3.1.4 Πλανητικό WRF

Το WRF εφαρμόζεται και για την εκτίμηση των ατμοσφαιρικών συνθηκών στους πλανήτες Άρη, Αφροδίτη και στον δορυφόρο του Κρόνου, Τιτάνα. Καθώς το μοντέλο είναι διαμορφωμένο για τα δεδομένα της Γης, είναι απαραίτητο να γίνουν κάποιες αλλαγές σε αρκετά μέρη. Έτσι άλλαξε η προβολή χαρτών σε κυλινδρική καθώς επίσης και ο τρόπος μέτρησης του χρόνου. Ακόμα, θεωρήθηκε μηδενική η ταχύτητα του ανέμου και η μεταφορά αερίων μαζών στους πόλους για να έχουμε σωστές πολικές οριακές συνθήκες. Τέλος, εφαρμόζονται διαφορετικές παραμετροποιήσεις για κάθε πλανήτη ξεχωριστά ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας, ηλιακής ακτινοβολίας και των αερίων που τους περιβάλλουν.

Τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά ενώ με την μελλοντική εφαρμογή του μοντέλου θα υπάρξουν πολλές βελτιώσεις. Το PlanetWRF είναι διαθέσιμο στην ιστοσελίδα <http://planetwrf.com>.

3.2 Σύγκριση WRF-ARW με το WRF-NMM

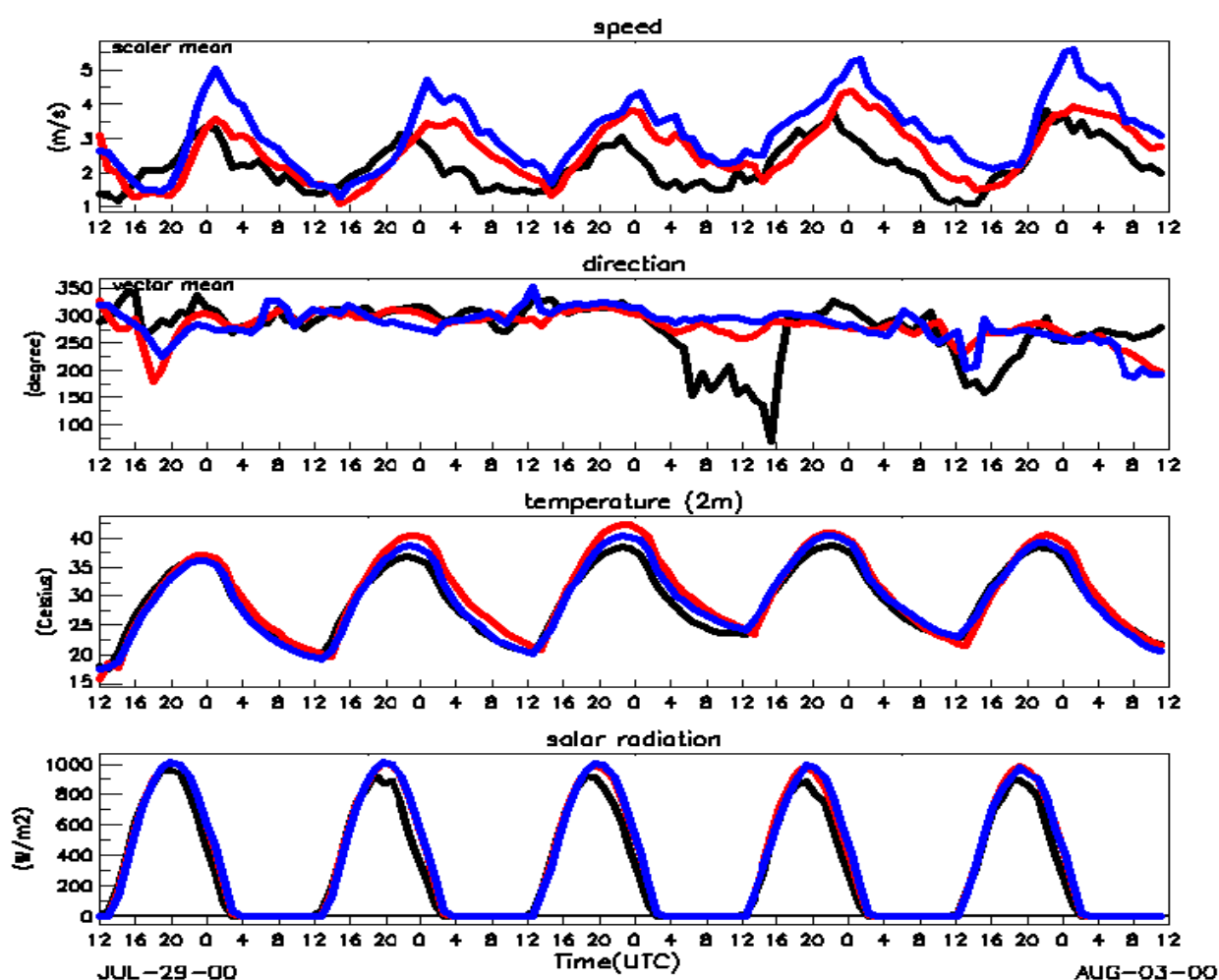
Η Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (NOAA), έκανε μια μελέτη για να συγκρίνει το υδροστατικό μοντέλο WRF-ARW και το μη-υδροστατικό WRF-NMM ως προς την εκτίμηση των μετεωρολογικών συνθηκών στο κατώτερο ατμοσφαιρικό στρώμα. Το πείραμα αφορούσε την Καλιφόρνια των Η.Π.Α. για το χρονικό διάστημα από 12 UTC 29 Ιουλίου 2000, έως 12 UTC 3 Αυγούστου 2000.

Και τα δύο είχαν ίδιου μεγέθους πλέγμα και εφαρμόστηκαν με αναλύσεις 12 χλμ και 4 χλμ αλλά εδώ θα μιλήσουμε μόνο για την δεύτερη ανάλυση. Είχαν 51 επίπεδα πλέγματος και το κατώτερο έφτανε τα 30μ πάνω από το έδαφος. Αρχικές και οριακές συνθήκες λαμβάνονταν από το σύστημα προεπεξεργασίας (WPS) και από την ανάλυση του μοντέλου ETA του Εθνικού Κέντρου Περιβαλλοντικών Προβλέψεων (NCEP). Και τα δύο χρησιμοποίησαν τα ίδια πρότυπα φυσικής της ατμόσφαιρας ενώ

το NMM είχε χρονικά βήματα των 16 δευτερολέπτων και το ARW των 8 δευτερολέπτων. Η διαφοροποίηση των δύο μοντέλων έγκειται στην χρονική συχνότητα εφαρμογής των φυσικών παραμετροποιήσεων.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το NMM ήταν ακριβέστερο στις προγνώσεις ιδιαίτερα στην πρόγνωση του ανέμου επιφανείας και της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Αντίθετα το ARW ήταν καλύτερο στην πρόγνωση της θερμοκρασίας των 2μ.

Τέλος, ένα συμπέρασμα που προέκυψε από το πείραμα, είναι ότι το NMM απαιτεί το πρότυπο παραμετροποίησης σωρειτών Betts-Miller-Janjic μαζί με το πρότυπο μικροφυσικής Ferrier για να υπάρξει καλύτερη προσομοίωση χρησιμοποιώντας το σύστημα προεπεξεργασίας WPS.



Σχήμα 11. Σύγκριση του μοντέλου NMM (κόκκινες γραμμές), του μοντέλου ARW (μπλε γραμμές) και των παρατηρήσεων (μαύρες γραμμές), για την ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου, την θερμοκρασία στα 2μ και την ηλιακή ακτινοβολία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Συμπεράσματα

Το WRF όπως αναφέρθηκε, είναι ένα μέσης κλίμακας μοντέλο νέας γενιάς με αρκετά θετικά στοιχεία, γεγονός που αποδεικνύεται από τον συνεχώς αυξανόμενο αριθμό χρηστών. Κατά τα εννέα χρόνια λειτουργίας του κατάφερε να κεντρίσει το ενδιαφέρον αρκετών επιστημόνων κι έτσι σήμερα εφαρμόζεται είτε επιχειρησιακά είτε ερευνητικά, σε ινστιτούτα, υπηρεσίες και πανεπιστήμια. Χρησιμοποιεί προηγμένο και ευέλικτο λογισμικό που δημιουργεί ένα φιλικό περιβάλλον προς τον χρήστη παρέχοντάς του πολλές δυνατότητες. Το σημαντικότερο πλεονέκτημά του έναντι άλλων μοντέλων αντίστοιχης κλίμακας είναι ότι δημιουργήθηκε γνωρίζοντας τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα άλλα μοντέλα και κατάφερε να τα ξεπεράσει. Ένα ακόμη θετικό στοιχείο του, είναι η συμβατότητά του με μία μεγάλη ποικιλία φυσικομαθηματικών προτύπων, παρέχοντας έτσι εναλλακτικές οδούς στον χρήστη. Επιπλέον με την χρήση του προτύπου Gressman παρέχεται καλύτερη συσχέτιση μεταξύ των παρατηρήσεων και των αντίστοιχων προγνωστικών τιμών. Ένα συμπέρασμα στο οποίο έχουν καταλήξει αρκετοί επιστήμονες είναι ότι εφαρμόζοντας μικρή χωρική ανάλυση (μικρότερη ή ίση από 4χλμ.), τα αποτελέσματα είναι πολύ καλά για τις πρώτες 24 ώρες της πρόγνωσης. Μετά την πρώτη ημέρα είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται μεγαλύτερη χωρική ανάλυση.

Όπως αναφέρθηκε, το WRF έχει δύο εφαρμογές, την υδροστατική έκδοση ARW και την μη-υδροστατική NMM. Έχει παρατηρηθεί ότι το ARW είναι πιο ευέλικτο και ικανό από το δεύτερο, κυρίως λόγω της χρήσης μετακινούμενων πλεγμάτων που παρέχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία στην παρατήρηση κυκλωνικών συστημάτων.

Σήμερα εργάζονται 21 ερευνητικές ομάδες για την περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωση του μοντέλου. Το μέλλον του μοντέλου προδιαγράφεται ευόινο αλλά θα πρέπει πάντα να έχουμε υπόψη μας ότι η ανάπτυξή του ακολουθεί και προϋποθέτει την πρόοδο της φυσικής και της τεχνολογίας.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξένη βιβλιογραφία

Amit P Kesarkar, et al, (2006). Coupling of WRF and AERMOD for Pollutant Dispersion Modeling, 7th WRF Users' Workshop 2006, session 3, WRF Chemistry

C. E. Newman, et al, (2009). Planetary and Global WRF, 10th WRF Users' Workshop 2009, session 6, Ongoing and future model development

Christopher Davis, Wei Wang, et al, (2007). Prediction of Landfalling Hurricanes with the Advanced Hurricane WRF Model,. Monthly Weather Review, 2008, vol. 136, pp 1990-2005

Dorita Rostkier-Edelstein, et al, (2009). High Resolution WRF-RTFDDA seasonal precipitation over complex terrain, 10th WRF Users' Workshop 2009, session 3A, Regional Climate Research

E. Sanmiguel-Rojas, J. Ortega-Casanova, et al, (2005). A Cartesian grid finite-difference method for 2D incompressible viscous flows in irregular geometries, Journal of Computational Physics, 2005, vol. 204, issue 1, pp 302-3186

Fang-Ching Chien, et al, 2004. A Real-time MM5/WRF Forecasting system in Taiwan, (2004). PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Users' Workshop

J.R. Garratt, (1992). The atmospheric boundary layer.

J. Michalakes, et al, (2004). The Weather Research and Forecast Model: Software architecture and performance, Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado 80307 U.S.A., 11th ECMWF Workshop on the USE of High performance Computing in Meteorology, 2004

J. Michalakes, et al, (2001). Development of a next-generation regional Weather Research and Forecast model, NOAA Forecast Systems Laboratory, Boulder, Colorado 80303 U.S.A, 9th ECMWF Workshop on the USE of High performance Computing in Meteorology, 2004

M. Stuefer, G. Grell3, et al, (2009). UAF Smoke: A WRF/CHEM smoke forecasting system for Alaska, 10th WRF Users' Workshop 2009, session 5A, WRF Chemistry

Nicole Molders, Huy Tran, (2009). Contribution of point emissions on the PM2.5 concentrations at breathing level, 10th WRF Users' Workshop 2009, session 5A, WRF Chemistry

Peter W. White, ECMWF Research Department, (2002), IFS Documentation, Part V: The Ensemble prediction system (CY25R1)

Sara A. Michelson, et al, (2007). Comparison of ARW and NMM simulations of low-level metrological conditions in California's central valley, 8th WRF Users' Workshop 2007, session 6, Model evaluation

Wei Wang, et al, (2008). ARW Version 2 Modeling System User's Guide, (2008). Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research

Wei Wang, (2005). Application of WRF in Real-Time Hurricane Prediction, Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado 80307 U.S.A.

Wei Wang, Chris Davis, et al, (2006). Evaluation of WRF-ARW High-Resolution Tropical Storm Forecasts in 2005 Season, 27th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, session 2A, The 2005 Atlantic season

Ελληνική βιβλιογραφία

Θεόδωρος Σ. Καρακώστας, Θεσσαλονίκη (2008). Σημειώσεις Συνοπτικής και Δυναμικής Μετεωρολογίας.

Διαδίκτυο

<http://serc.carleton.edu>
<http://www.dtcenter.org/wrf-nmm/users>
<http://www.hnms.gr>
<http://www.meted.ucar.edu>
<http://www.meteo.noa.gr>
<http://www.mmm.ucar.edu>
<http://www.wrf-model.org>