

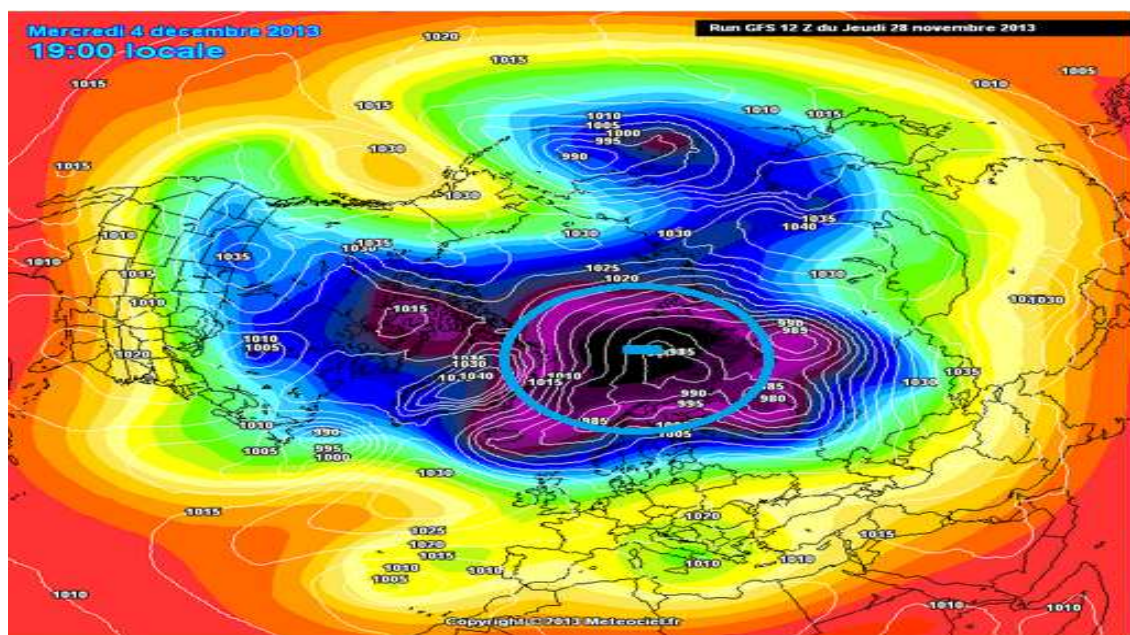


ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ , ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΚΑΙΡΟΥ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥΣ



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ , ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΚΑΙΡΟΥ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥΣ

ΡΑΚΟΥ ΖΗΣΩ ΑΕΜ:4750

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ :

ΠΥΘΑΡΟΥΛΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΑΠΘ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2014

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ιωάννη Πυθαρούλη, Επίκουρο καθηγητή στον τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας, στην Σχολή Θετικών Επιστημών του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και επιβλέποντα της παρούσας Διπλωματικής για την υποστήριξη και καθοδήγησή του για την ολοκλήρωση της Διπλωματικής μου Εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου που με στήριξε και με στηρίζει όλα αυτά τα χρόνια, τόσο για την ψυχική όσο και για την οικονομική υποστήριξη. Τους ευχαριστώ για την ανεκτίμητη βοήθεια που μου έχουν προσφέρει και συνεχίζουν να μου προσφέρουν.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η ανάλυση των χαρακτηριστικών και των μεθόδων αξιολόγησης των αριθμητικών μοντέλων πρόγνωσης καιρού. Με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών συστημάτων και ιδιαίτερα με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών μπόρεσε να πραγματοποιηθεί η αριθμητική πρόγνωση του καιρού με την δημιουργία των αριθμητικών μοντέλων πρόγνωσης καιρού. Οι αξιολογήσεις των προγνώσεων είναι ο καλύτερος τρόπος για να μπορέσει να φανεί η αξιοπιστία και η ακρίβεια ενός αριθμητικού μοντέλου καιρού, είτε είναι υδροστατικό είτε είναι μη υδροστατικό και αποτελεί την διαδικασία όπου προσδιορίζει την ποιότητα των προβλέψεων.

Αρχικά, αναφέρονται τα στάδια εξέλιξης των ατμοσφαιρικών μοντέλων με το πέρασμα του καιρού όπου δρομολογείτε από τις πρώτες ιδέες και προσπάθειες προσέγγισης προσομοίωσης της ατμόσφαιρας καταλήγοντας μέχρι τις μέρες μας. Έπειτα, αφού αναφερθούν μερικά βασικά στοιχεία για την αριθμητική πρόγνωση του καιρού, αναπτύσσεται ο τρόπος με τον οποίο δημιουργείται το μοντέλο με αναφορά στις βασικές έννοιες που το περιγράφουν καθώς επίσης και σε βασικές αρχές, μαθηματικές και φυσικές, που το καθορίζουν.

Ακολουθεί μια περιγραφή των επιχειρησιακών αριθμητικών μοντέλων χαρακτηριστικών και των προϊόντων των μοντέλων που χρησιμοποιούνται στον Ελλαδικό χώρο όπως αυτό του WRF, WRF-NMM, SKIPΩN και ΠΟΣΕΙΔΩN. Στη συνέχεια της συγκεκριμένης εργασίας παρουσιάζονται οι μέθοδοι αξιολόγησης των αριθμητικών μοντέλων με στατιστικά μεγέθη συνεχών και διακριτών μετεωρολογικών μεταβλητών όπου δημιουργήθηκε κατάλληλη μεθοδολογία στατιστικής ανάλυσης με την εφαρμογή πλήθους αποδεκτών στατιστικών ελέγχων. Το σύνολο αυτών των στατιστικών ελέγχων καλύπτει μετρήσεις της σχέσης ανάμεσα στα προγνωστικά πεδία και την πραγματική κατάσταση της ατμόσφαιρας. Τέλος, παρουσιάζονται ερευνητικές εργασίες στις οποίες πραγματοποιείται στατιστική αξιολόγηση των αριθμητικών μοντέλων πρόγνωσης καιρού σε Ελλάδα και Ευρώπη.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	7
<i>Εισαγωγή</i>	7
1.1 Καιρός, πρόγνωση και η ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί στην πρόγνωση καιρού 7	
1.2 Δομή της εργασίας	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	10
<i>Αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού</i>	10
2.1 Εισαγωγή	10
2.2 Επίλυση του προβλήματος της πρόγνωσης καιρού.....	11
2.3 Σχεδιασμός και χαρακτηριστικά μοντέλου	18
2.3.1 Βήματα για τον ορισμό του μοντέλου	19
2.3.2 Καθορισμός του προβλήματος.....	20
2.3.3 Καθορισμός της διάστασης του μοντέλου.....	20
2.3.4 Επιλογή διαδικασιών για την προσομοίωση του μοντέλου	21
2.3.5 Επιλογή μεταβλητών	22
2.3.6 Χρονικό βήμα και προγνωστικός ορίζοντας.....	22
2.3.7 Δομή περιοχής του πλέγματος.....	22
2.3.8 Οριζόντιο πλέγμα	23
2.3.9 Κατακόρυφο πλέγμα	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	33
<i>Περιγραφή επιχειρησιακών αριθμητικών μοντέλων</i>	33
3.1 Μοντέλο Πρόβλεψης Καιρού WRF.....	33
3.1.1 Πως δημιουργήθηκε το WRF.....	34
3.1.2 Χρήση του μοντέλου WRF	35
3.2 Το Σύστημα Πρόγνωσης Καιρού ΠΟΣΕΙΔΩΝ	36
3.3 Μοντέλο SKIRON	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	42
<i>Μέθοδοι αξιολόγησης αριθμητικών μοντέλων</i>	42
4.1 Στατιστικά μεγέθη συνεχών μετεωρολογικών μεταβλητών.....	43
4.2 Στατιστικά μεγέθη διακριτών μετεωρολογικών μεταβλητών	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	53
<i>Μελέτες αξιολόγησης αριθμητικών μοντέλων πρόγνωσης καιρού</i>	53
5.1 Αξιολόγηση του μοντέλου COSMO.GR σε περίπτωση έντονων βροχοπτώσεων	53

5.2 Αξιολόγηση του μοντέλου WRF - ARW σε περίπτωση έντονων βροχοπτώσεων στην Χαλκιδική.....	58
5.3 Η εφαρμογή συστήματος αφομοίωσης δεδομένων και η επίδραση του στην προγνωστική ικανότητα ενός ατμοσφαιρικού μοντέλου περιορισμένης περιοχής.....	61
5.4 Αξιολόγηση του μοντέλου WRF σε περίπτωση έντονου επεισοδίου ανέμου Βαρδάρη..	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	83
Συμπεράσματα	83
ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	85
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	88
ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ.....	91

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Καιρός, πρόγνωση και η ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί στην πρόγνωση καιρού

Η ατμόσφαιρα αποτελεί σημαντικό στοιχείο του φυσικού περιβάλλοντος για τον άνθρωπο όπου ζει μέσα σ' αυτό και αναπτύσσεται. Για το λόγο αυτό οι επιστήμονες αρκετά νωρίς ενδιαφέρθηκαν για την κατανόηση των φυσικών φαινομένων και την πρόγνωση του καιρού. Έτσι, η πρόβλεψη των έντονων καιρικών φαινομένων (ισχυρών βροχοπτώσεων, χιονοπτώσεων, θυελλωδών ανέμων κ.τ.λ.) αποκτά όλο και μεγαλύτερη πρακτική αξία αφού τα φαινόμενα αυτά επιδρούν άμεσα στην κοινωνική και οικονομική ζωή.

Με τον γενικό όρο «καιρός» εννοούμε τη φυσική κατάσταση της ατμόσφαιρας της Γης σε συγκεκριμένο τόπο και χρόνο από την άποψη της θερμοκρασίας, της πίεσης, της υγρασίας και του υφισταμένου ανέμου (ένταση και διεύθυνση), με ότι άλλο φαινόμενο συνοδεύει αυτά, τόσο στην ξηρά, όσο και στη θάλασσα ή στον υπερκείμενο αέρα πάντα του ίδιου τόπου. Η Μετεωρολογία είναι η επιστήμη που εξετάζει τον καιρό. Επομένως θα μπορούσε να ορισθεί ότι καιρός είναι το σύνολο των μετεωρολογικών παραμέτρων σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία και σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή (Μακρογιάννης και Σαχσαμάνογλου 2004).

Οι "μηχανές" που παράγουν τις διάφορες ατμοσφαιρικές καταστάσεις ανά τον κόσμο είναι πρωταρχικά ο Ήλιος, ως πηγή ενέργειας όπου θερμαίνει κυρίως την ατμόσφαιρα, αλλά και τις υγρές και στερεές μάζες στην επιφάνεια της Γης, και στη συνέχεια η Γη, με τις κινήσεις της, και η Ατμόσφαιρα που την περιβάλλει. Έτσι οι τρεις αυτές οντότητες συγκροτούν ένα "θερμικό σύστημα". Όλα τα συναφή φαινόμενα, λεγόμενα και "καιρικά φαινόμενα" συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα, και πιο συγκεκριμένα στο χαμηλότερο τμήμα της, την Τροπόσφαιρα. Αυτά τα φαινόμενα επιδρούν στην επιφάνεια της Γης και κατά συνέπεια σε ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η γεωργία και διάφορες άλλες παραγωγικές δραστηριότητες, η ναυσιπλοΐα, τα ταξίδια κ.α. και γι' αυτό το λόγο η μελέτη και η πρόγνωσή τους έχει ιδιαίτερο οικονομικό και κοινωνικό ενδιαφέρον με αποτέλεσμα την ανάπτυξη του κλάδου της μετεωρολογίας.

Για να γίνει περισσότερο αντιληπτός ο μηχανισμός της δημιουργίας του καιρού, δηλαδή του θερμικού συστήματος Ήλιος-Γη-Ατμόσφαιρα προηγουμένως θα πρέπει να έχουν γίνει κατανοητές οι φυσικές ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των παραπάνω συντελεστών. Επίσης πρέπει να γίνει κατανοητό ο ρόλος της Γης και της ατμόσφαιράς της, τόσο στη δημιουργία, όσο και στην εξέλιξη των καιρικών φαινομένων ή μετεωρολογικών φαινομένων (Μακρογιάννης και Σαχσαμάνογλου 2004).

Με τον όρο πρόγνωση καιρού εννοούμε τη διαδικασία της πρόβλεψης, της εξέλιξης κάποιας φυσικής κατάστασης της τροπόσφαιρας, στο μέλλον. Και αν το μέλλον αυτό αφορά τα επόμενα 1,2 ή 3 24-ωρα, τότε εννοούμε την πρόγνωση μικρής διάρκειας, ενώ όταν αφορά μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα όπως 4 ημερών, μιας βδομάδας και περισσότερο διάστημα τότε εννοούμε την πρόγνωση μακράς διάρκειας. Σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της πρόγνωσης καιρού έπαιξε και η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών συστημάτων όπως τα ραντάρ με αποκορύφωμα την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών όπου μέσω αυτών πραγματοποιήθηκε η αριθμητική πρόγνωση του καιρού (Κατσαφάδος, 2007).

Τα αριθμητικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια για την πρόγνωση του καιρού είναι τόσο υδροστατικά όσο και μη υδροστατικά (Hashimoto, et al. 2008). Τα μοντέλα πρόγνωσης καιρού έχουν φτάσει σε τέτοιες οριζόντιες αναλύσεις με σκοπό η υδροστατική προσέγγιση σταματάει να είναι έγκυρη. Για το λόγο αυτό, αποτελεί προτεραιότητα πολλών μετεωρολογικών υπηρεσιών και ιδρυμάτων η διαμόρφωση και η εφαρμογή των μη υδροστατικών μοντέλων αριθμητικής πρόγνωσης καιρού. Ένα μη υδροστατικό μοντέλο οφείλει να έχει τουλάχιστον παρόμοια ακρίβεια (στην ίδια ανάλυση) με τα υδροστατικά και την ικανότητα να αναπαράγει σωστά μη υδροστατικές ροές σε υψηλές αναλύσεις για να είναι επιτυχές. Σε χαμηλές αναλύσεις δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά, αντίθετα σε υψηλές αναλύσεις τα μη υδροστατικά μοντέλα προσφέρουν καλύτερα αποτελέσματα (Hashimoto, et al. 2008).

Ο καλύτερος τρόπος για να μπορέσει να φανεί η αξιοπιστία και η ακρίβεια ενός αριθμητικού μοντέλου καιρού, είτε είναι υδροστατικό είτε είναι μη υδροστατικό, είναι οι αξιολογήσεις των προγνώσεων. Η αξιολόγηση της πρόγνωσης είναι η διαδικασία του προσδιορισμού της ποιότητας των προβλέψεων. Υπάρχει ποικιλία διαδικασιών επαλήθευσης της πρόγνωσης, αλλά όλες αφορούν τη σχέση μεταξύ της πρόβλεψης ή του συνόλου των

προβλέψεων και της αντίστοιχης παρατήρησης. Οποιαδήποτε μέθοδος αξιολόγησης των παρατηρήσεων περιλαμβάνει αναγκαστικά συγκρίσεις μεταξύ των ζευγαριών των προβλέψεων και των παρατηρήσεων (Wilks, 1995).

1.2 Δομή της εργασίας

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η παροχή των εισαγωγικών γνώσεων και πληροφοριών σε ότι αφορά τον τομέα της μοντελοποίησης των ποικίλων διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα, αποσκοπώντας στην πρόβλεψη των καιρικών φαινομένων με την χρήση των ατμοσφαιρικών μοντέλων πρόγνωσης καιρού και την γνωστοποίηση των σταδίων εξέλιξης τους καθώς, και η αξιολόγηση των ατμοσφαιρικών μοντέλων πρόγνωσης καιρού. Για την καλύτερη παρουσίαση και κατανόηση των αποτελεσμάτων, προηγούνται μια σειρά από κεφάλαια που βοηθούν στην επεξήγηση των εννοιών.

Στο Κεφάλαιο 2, περιγράφονται αναλυτικά οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού καθώς και τα στάδια της εξέλιξης τους.

Στο Κεφάλαιο 3, περιγράφονται διάφορα επιχειρησιακά αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού και η χρήση αυτών.

Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται οι μέθοδοι αξιολόγησης των αριθμητικών μοντέλων με στατιστικά μεγέθη συνεχών μετεωρολογικών μεταβλητών καθώς και με στατιστικά μεγέθη διακριτών μετεωρολογικών μεταβλητών.

Στο Κεφάλαιο 5, πραγματοποιείται στατιστική αξιολόγηση των αριθμητικών μοντέλων πρόγνωσης καιρού σε Ελλάδα και Ευρώπη όπου παρουσιάζονται κάποιες έρευνες και τα αποτελέσματα τους τόσο στον Ελλαδικό χώρο όσο και στην Ευρώπη.

Στο Κεφάλαιο 6, αναλύονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού

2.1 Εισαγωγή

Το ανθρώπινο γένος ανέκαθεν έκανε προσπάθειες προκειμένου να κατανοήσει τους περίπλοκους νόμους που καθορίζουν τους μηχανισμούς του σύμπαντος.

Προκειμένου να δώσουν εξηγήσεις για τον τυχαίο και ανεξήγητο γι' αυτούς κόσμο, οι αρχαιότεροι πολιτισμοί που δε παρείχαν το απαραίτητο υπόβαθρο γνώσεων, έπλαθαν θεότητες και δημιουργούσαν μύθους. Όμως, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα επινόησαν ορισμένες πρωτόγονες μεθόδους για την πρόβλεψη κάποιων περιοδικών φυσικών φαινομένων, παρατηρώντας προσεκτικά τη φύση και μελετώντας τους μηχανισμούς της, όπως για παράδειγμα τις κινήσεις των ουρανίων σωμάτων και τις αλλαγές των εποχών. Ωστόσο, σταδιακά οι θεότητες αντικαταστήθηκαν από κύκλους, σχήματα, αριθμούς, μαθηματικά (Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, 2014).

Ωστόσο, στις ημέρες μας ενώ η μια θεωρία ανατρέπει την άλλη και το ένα πρότυπο αντικαθιστά το άλλο, μόνο ένα πράγμα παραμένει σταθερό : Οι νόμοι της φύσης είναι μαθηματικοί. Ο θεός είναι γεωμέτρης. Το 1587 στο βιβλίο “Οι Μαθηματικές Αρχές της Φυσικής Φιλοσοφίας” του Ισαάκ Νεύτωνα διατυπώθηκε η άποψη ότι η φύση έχει νόμους τους οποίους έχουμε τη δυνατότητα να τους αποκαλύψουμε και να τους περιγράψουμε με μαθηματικές μεθόδους. Ο Νεύτωνας χρησιμοποιώντας πολύπλοκες μαθηματικές εξισώσεις περιέγραψε τους φυσικούς νόμους. Αυτές οι πολύπλοκες μαθηματικές εξισώσεις όχι μόνο συσχετίζουν διάφορες φυσικές παραμέτρους μεταξύ τους, αλλά επιπλέον υπολόγιζαν και τους ρυθμούς μεταβολής αυτών, δηλαδή τις παραγώγους. Είναι γνωστές σαν διαφορικές εξισώσεις, οι εξισώσεις που περιέχουν ρυθμούς μεταβολής των αγνώστων και αποτελούν το βασικότερο μαθηματικό εργαλείο για την περιγραφή των κινήσεων της ατμόσφαιρας. Η λύση των εξισώσεων αυτών είναι μοναδική εάν οι αρχικές τιμές όλων των μεγεθών που αποτελούν το σύστημα είναι γνωστές με ακρίβεια (Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, 2014).

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.

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. (www.hnms.gr)

Το 1922 πρώτος ο μαθηματικός Λιούις Φράι Ρίτσαρντσον συνέλαβε την ιδέα της περιγραφής των φυσικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις της υδροδυναμικής και των ρευστών. Στο έργο του «Η πρόβλεψη του καιρού με αριθμητικές μεθόδους» περιέγραφε τις μαθηματικές μεθόδους μέσω των οποίων ο άνθρωπος θα μπορούσε να προβλέψει την εξέλιξη του καιρού με τα τεχνικά μέσα της εποχής εκείνης. Η ιδέα του απαιτούσε την ύπαρξη ενός μεγάλου αριθμού ανθρώπων, οι οποίοι χρησιμοποιώντας χαρτί, μολύβι και αριθμομηχανές γραφείου, θα επέλυναν τις μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν τις κινήσεις της ατμόσφαιρας και θα προέβλεπαν την εξέλιξη του καιρού. Υπολόγισε ότι θα χρειαζόνταν 64.000 άνθρωποι προκειμένου να επιτευχθεί η πρόβλεψη του καιρού με την ίδια ταχύτητα με την οποία αυτός εξελίσσεται στην πραγματικότητα. Είχε μάλιστα διατυπώσει την άποψη ότι ίσως στο μακρινό μέλλον το ανθρώπινο γένος θα είχε τη δυνατότητα να προχωρεί στους υπολογισμούς γρηγορότερα από ότι προχωρεί ο καιρός. Προφητικά λόγια, μόνο που το μακρινό μέλλον ήταν μόλις 40 χρόνια μετά. (www.hnms.gr)

2.2 Επίλυση του προβλήματος της πρόγνωσης καιρού

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 (Πυθαρούλης και Παπαγεωργίου 2006).

Τα μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού (Numerical Weather Prediction models, NWP) πρωτοεμφανίστηκαν το 1950 μετά την πρωτοποριακή δουλειά των *Charney, Fjortoft, και von Neumann*, οι οποίοι χρησιμοποίησαν μια υψηλά φιλτραρισμένη, χαμηλής ανάλυσης έκδοση των δυναμικών εξισώσεων, και πραγματοποίησαν την πρώτη 48-ωρών πρόγνωση καιρού τρέχοντας ένα βαροτροπικό μοντέλο στον ENIAC. Αυτή ήταν η πρώτη επιτυχής αριθμητική πρόγνωση καιρού και στη συνέχεια έγινε και η ολοκλήρωση της βαροτροπικής εξίσωσης του στροβιλισμού με την χρήση αυτού του μοντέλου στα 500 hPa με

15x18 σημεία πλέγματος με $\Delta x=736$ km και έκτοτε βρίσκονται στο προσκήνιο. Τα πρώιμα μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού είχαν τις βάσεις τους σε θεωρίες παραπλήσιες με τη γεωστροφική, προκειμένου να αναπτύξουν συνεπή μοντέλα χαμηλής ανάλυσης, τα οποία ωστόσο από τη φύση του σχεδιασμού τους, δεν μπορούσαν να συμπεριλάβουν μια σειρά από σημαντικές φυσικές διαδικασίες κυρίως λόγω έλλειψης επαρκούς γνώσης και υπολογιστικής δύναμης. Τα μοντέλα αυτά κυριάρχησαν στις δεκαετίες του '50 και του '60, όταν χρησιμοποιούνταν κυρίως για ημισφαιρικές βραχυπρόθεσμες προβλέψεις (έως και 3 μέρες μπροστά) και για τη μελέτη των μετεωρολογικών διεργασιών. Αυτά τα πρόωρα μοντέλα είχαν ως σκοπό μικρής κλίμακας διαδικασίες, όπως η εξέλιξη των καιρικών συστημάτων μέσω γεωγραφικών πλατών, τα οποία χαρακτηρίζονται από οριζόντιες κλίμακες της τάξης των εκατοντάδων χιλιομέτρων, χρονικούς ορίζοντες λίγων ημερών και σύνθετες δομές της τροπόσφαιρας. Επίσης οι επαληθεύσεις των προβλέψεων είχαν πραγματοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό και ως ένα βαθμό ακόμη πραγματοποιούνται, ως συνάρτηση της ποιότητας των προγνώσεων στη μέση τροπόσφαιρα (π.χ. γεωδυναμικού στα 500 hPa) , ή με τη βοήθεια μιας ανάλυσης της εξέλιξης των κύριων μετεωρολογικών συστημάτων. Λόγω του ότι τα μοντέλα αυτά δεν λάμβαναν υπόψη μια σειρά από εξωγενείς ισχυρές ατμοσφαιρικές διαδικασίες, όπως η διακύμανση στη θερμοκρασία της επιφάνειας της γης, και πολλές άλλες σημαντικές διαδικασίες (όπως η ακτινοβολία και η μετάβαση φάσης) ,διέθεταν περιορισμένες δυνατότητες πρόβλεψης. Ωστόσο, από την άλλη μεριά, τα πρώιμα μοντέλα αποτελούσαν έναν πρόδρομο των σημερινών μετεωρολογικών μοντέλων διότι περιελάμβαναν σύστημα αφομοίωσης δεδομένων για την αρχικοποίηση του μοντέλου, σύστημα διακριτών εξισώσεων γραμμένες σε σφαιρικές συντεταγμένες και μια πιστή αναπαράσταση της τοπογραφίας της επιφάνειας της γης (Phillips 1957).

Ο Charney το 1955 πρότεινε τη χρησιμοποίηση ενός πιο πλήρους και ακριβούς συνόλου εξισώσεων , για τις οποίες υιοθετήθηκε ο όρος «θεμελιώδεις εξισώσεις» ("primitive equations") οι οποίες ήταν μια εκδοχή των εξισώσεων που περιέγραφαν τις εξισώσεις Navier-Stokes με μια σημαντική ενσωματωμένη προσέγγιση: η κάθετη εξίσωση ορμής αντικαταστάθηκε από τον υδροστατικό όρο σύμφωνα με τον οποίο η κάθετη κίνηση του ανέμου κυρίως η κατακόρυφη επιτάχυνση είναι αμελητέα σε σχέση με την οριζόντια κίνηση και το κατακόρυφο εύρος του ρευστού είναι πολύ μικρότερο, σε σύγκριση με την ακτίνα της ατμόσφαιρας. Αυτό τα μοντέλα θεμελιωδών εξισώσεων χρησιμοποιήθηκαν ευρύτατα από την επιστημονική κοινότητα κατά τη δεκαετία του '60, αν και καθιερώθηκαν πλήρως στον κλάδο της πρόβλεψης καιρού μόλις στα τέλη της δεκαετίας του '70.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '70 τα ατμοσφαιρικά μοντέλα εδραιώθηκαν παγκοσμίως, καθώς το σύνολο των θεμελιωδών εξισώσεων έγινε πιο διαδεδομένο, και ένα σύνολο διαδικασιών προστέθηκε προοδευτικά στα υπάρχοντα μοντέλα. Για λόγους που ίσως έχουν να κάνουν με την ιστορία της ανάπτυξης των μοντέλων, ένα μοντέλο αριθμητικής πρόγνωσης καιρού (μοντέλο NWP), συνήθως χαρακτηρίζεται ως σύνολο τριών κύριων συνιστωσών:

- του «δυναμικού» πυρήνα που έχει να κάνει με το βασικό σύνολο εξισώσεων της αδιαβατικής ροής ρευστών χωρίς ιξώδες ,
- του πακέτου φυσικών διεργασιών, το οποίο περιλαμβάνει ένα μεταβλητό αριθμό εξισώσεων που αναπαριστούν φυσικές διαδικασίες όπως η ακτινοβολία, οι αλλαγές στη φάση του νερού, η μεταγωγή θερμότητας ή η τυρβώδη ροή κλπ.
- και τέλος του κώδικα αφομοίωσης δεδομένων.

Τα παγκόσμια μοντέλα θεμελιωδών εξισώσεων εξακολουθούν να αποτελούν τον πυρήνα της διαδικασίας πρόγνωσης του καιρού. Έχουν εξελιχτεί σημαντικά αποκτώντας υψηλότερη ανάλυση τις τρεις τελευταίες δεκαετίες, πιο ακριβείς φυσικές παραμετροποιήσεις, βελτιωμένα συστήματα αφομοίωσης δεδομένων και μεγαλύτερη υπολογιστική δύναμη. Ταυτόχρονα ο χρονικός ορίζοντας των προγνώσεων έχει επεκταθεί ώστε να υπερβαίνει τη μία εβδομάδα και σύγχρονες στατιστικές τεχνικές έχουν αφομοιωθεί στη διαδικασία πρόγνωσης με σκοπό την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας των δεδομένων και των μοντέλων. Παρά τη συνεχή πρόοδο των μετεωρολογικών προγνώσεων, είναι ευνόητο το γεγονός ότι υπεισέρχονται περιορισμοί στην προβλεψιμότητα της ατμοσφαιρικής ροής. Ωστόσο, ο *Lorenz* ο οποίος είναι θεμελιωτής της «Θεωρίας του Χάους» ανακάλυψε ότι πολύ μικρές διαφορές στην αρχική κατάσταση των μοντέλων τείνουν να αυξάνονται με το χρόνο, κατευθύνοντας σε ποιοτικά διαφορετικές προγνώσεις σε βάθος χρόνου δύο εβδομάδων. Ακόμα και στο πιο ιδανικό μοντέλο, υπάρχει ένα άνω όριο ως προς τη χρησιμότητα των προγνώσεων εξαιτίας της ύπαρξης ορίων στην ακρίβεια της εκτίμησης της αρχικής κατάστασης.

Σε γενικές γραμμές η μετεωρολογική πρόγνωση είναι ένα πρόβλημα αρχικών και συνοριακών τιμών. Η αρχική τρισδιάστατη ατμοσφαιρική κατάσταση, σε ένα παγκόσμιο μοντέλο η οποία συχνά μαρτυρείται με τον όρο «ανάλυση», υπολογίζεται μέσω παρατηρήσεων. Βεβαίως, καθώς οι παρατηρήσεις είναι από τη φύση τους φτωχές σε πληροφορία και έχουν λάθη, οι κώδικες αφομοίωσης δεδομένων των μοντέλων αριθμητικών προγνώσεων καιρού έχουν εξελιχθεί σε

πολύ ευέλικτους επεξεργαστές δεδομένων που προσπαθούν να εξάγουν τη καλύτερη δυνατή εκτίμηση της αρχικής κατάστασης από ένα διάσπαρτο σύνολο διαφορετικών παρατηρήσεων, οι οποίες προέρχονται από ραδιοβολίδες, δορυφόρους, αεροπλάνα, σταθμούς στην επιφάνεια της γης κ.λ.π. Τα μοντέλα επίσης χρειάζονται συνοριακές συνθήκες, οι οποίες να ορίζουν τις μεταβολές των μεταβλητών του μοντέλου εντός των ορίων ενός πεδίου τιμών. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των παγκόσμιων μοντέλων οι συνοριακές συνθήκες απαιτούνται για όλο το χρονικό διάστημα της πρόγνωσης τόσο στην επιφάνεια (ξηρά και θάλασσα) όσο και στα υψηλότερα επίπεδα του πεδίου πρόγνωσης. Ενώ, στην περίπτωση τοπικών μοντέλων πρόγνωσης καιρού, απαιτούνται χρονικά μεταβαλλόμενες συνοριακές συνθήκες και στα πλευρικά σύνορα.

Εξαιτίας του ισχυρού ημερήσιου κύκλου των ατμοσφαιρικών διαδικασιών που σχετίζονται με τις χερσαίες επιφάνειες, σε όλα τα μετεωρολογικά μοντέλα έχουν συμπεριληφθεί εξειδικευμένες μοντελοποιήσεις για την εκτίμηση των ιδιοτήτων του εδάφους (όπως θερμοκρασία και περιεχόμενο σε νερό). Ενώ, τα συνηθισμένα μοντέλα αριθμητικών προγνώσεων καιρού δεν περιλαμβάνουν με τον ίδιο τρόπο τις μοντελοποιήσεις των ωκεανών, η θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας και περιοχών όπου είναι μόνιμα καλυμμένες από πάγο και παγόβουνα σε γενικές γραμμές υπαγορεύεται από την κλιματολογία ή ημερήσια δεδομένα. Ωστόσο, κάποια μοντέλα έχουν αρχίσει να υιοθετούν αναπαραστάσεις υδάτινων περιοχών της ξηράς (ποταμών, λιμνών), οι οποίες μπορεί να έχουν σημαντικούς ημερήσιους κύκλους (ΤΟΓΕΛΟΥ, 2010).

Η εξέλιξη των συνθηκών της ατμόσφαιρας μπορεί να περιγραφεί από νόμους της φυσικής που εκφράζονται από μαθηματικές εξισώσεις που συσχετίζουν στο χώρο και στο χρόνο τις μεταβολές βασικών μετεωρολογικών μεταβλητών (όπως, θερμοκρασία, υγρασία, άνεμο, πίεση) με το αίτιο που τις προκάλεσε. Έτσι, η γνώση των αρχικών συνθηκών της ατμόσφαιρας επιτρέπει την πρόγνωση των νέων συνθηκών της ατμόσφαιρας σε μελλοντικό χρόνο (πρόγνωση).

Στην αριθμητική πρόγνωση καιρού, οι μελλοντικές τιμές των μετεωρολογικών μεταβλητών (forecast) μπορούν να υπολογιστούν βρίσκοντας τις αρχικές τους τιμές (initial) και στη συνέχεια προσθέτοντας την επίδραση των διαφόρων φυσικών διεργασιών που τις επηρεάζουν κατά τη διάρκεια της προγνωστικής περιόδου. Οι χάρτες επιφανείας ήταν το βασικό εργαλείο για την πρόγνωση του καιρού κυρίως στις αρχές του 20ου αιώνα αλλά και σήμερα είναι ένα σημαντικό όργανο για την πραγματοποίηση της πρόγνωσης. (σχήμα 2.1)

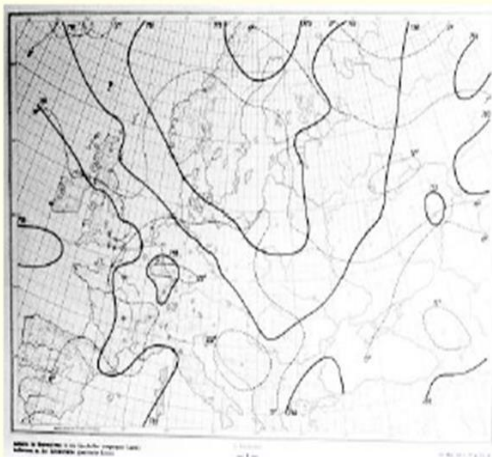
$$A^{forecast} = A^{initial} + F(A)\Delta t$$

όπου

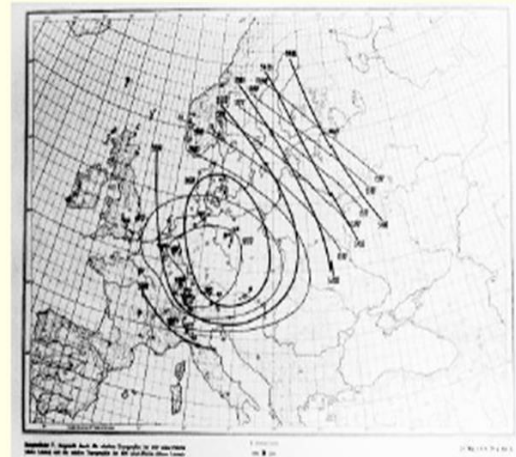
Δt είναι η μεταβολή του χρόνου

$F(A)$ αναπαριστά τους όρους που μπορούν να προκαλέσουν μεταβολή στην τιμή της μεταβλητής A και οι οποίοι με τη σειρά τους επηρεάζονται από την τιμή της μεταβλητής A (σχήμα 2.2, 2.3). (Lynch 2004)

The Leipzig Charts for 0700 UTC, May 20, 1910



Bjerknes' sea level pressure analysis.



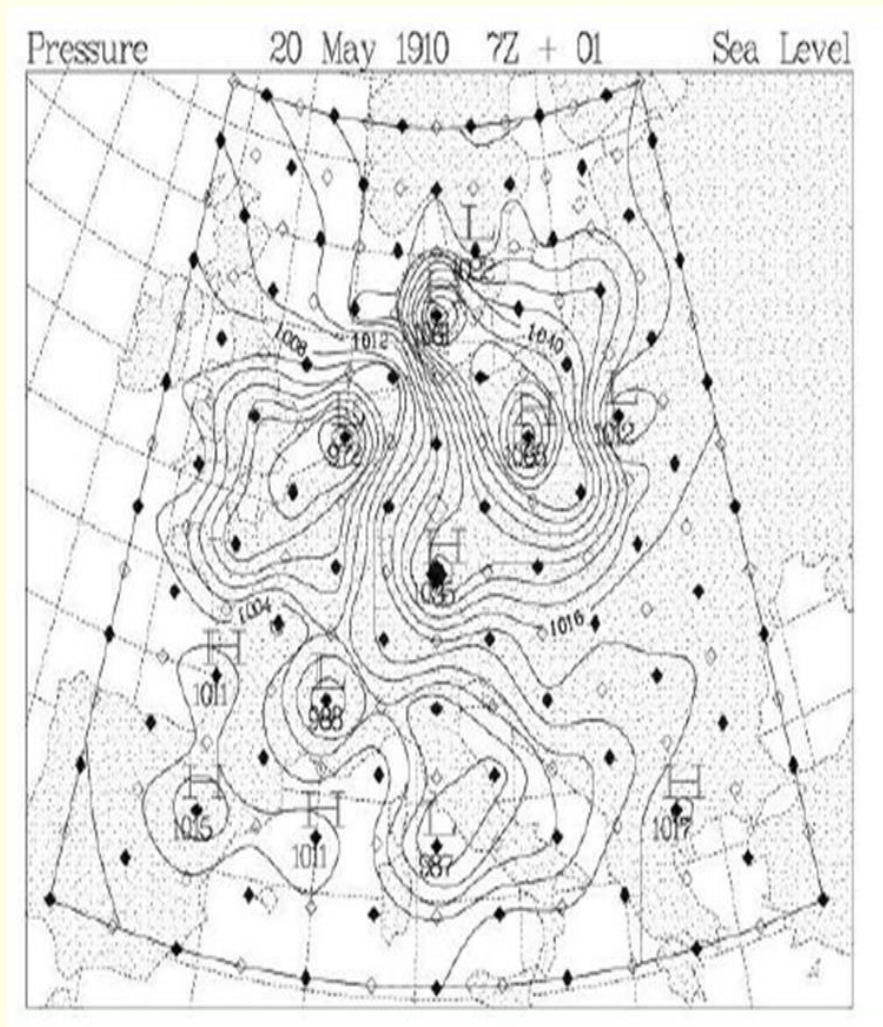
Bjerknes' 500 hPa height analysis.

Some of the initial data for Richardson's "forecast".

Σχήμα 2.1. α) Ανάλυση της πίεσης στο επίπεδο της θάλασσας (αριστερά) β) Ανάλυση στα 500 hPa (δεξιά) σε χάρτες για 0700 UTC, 20 Μαΐου 1910.

Πηγή (Lynch, 2004)

Forecast without Filtering



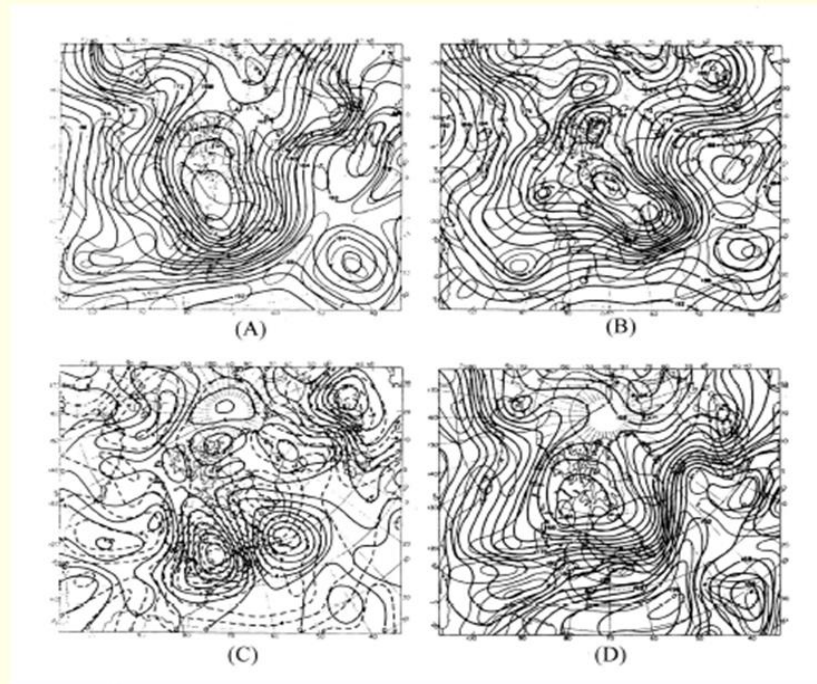
Short-range forecast of sea-level pressure, from *uninitialized data*. The contour interval is 4 hPa. Single forward time step of size $\Delta t = 3600$ s.

22

Σχήμα 2.2: Βραχυπρόθεσμη πρόγνωση της πίεσης της στάθμης της θάλασσας, για πίεση 4hPa και για χρόνο $\Delta t=3600$ s για την περίοδο 20 Μαΐου 1910.

Πηγή (www.hnms.gr)

ENIAC: First Computer Forecast



Σχήμα 2.3: Οι πρώτες προβλέψεις που πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια των υπολογιστών. Πηγή (www.hnms.gr)

2.3 Σχεδιασμός και χαρακτηριστικά μοντέλου

Γενικά, ο όρος Αριθμητικές Μετεωρολογικές Προβλέψεις καλύπτει της μεθόδους προσομοίωσης των ατμοσφαιρικών διαδικασιών και φαινομένων σε Η/Υ με σκοπό την πρόβλεψη της μελλοντικής διαμόρφωσης της ατμόσφαιρας, βασιζόμενοι πάντα στα τωρινά πραγματικά δεδομένα. Η επιτυχία στις προβλέψεις οφείλεται και στο γεγονός ότι σήμερα οι περισσότερες φυσικές διαδικασίες της ατμόσφαιρας είναι γνωστές.

Η λήψη των πραγματικών δεδομένων γίνεται από σταθμούς σε όλο το κόσμο και από δορυφόρους. Όλα τα αριθμητικά δεδομένα υπόκεινται σε μια διαδικασία ελέγχου, όπου επιχειρείται να απομονωθούν τα εσφαλμένα δεδομένα και να συμπληρωθούν τα κενά στις γεωγραφικές περιοχές μεταξύ των σταθμών (π.χ στους ωκεανούς). Η παραπάνω διαδικασία είναι σημαντική και για τη διόρθωση χρησιμοποιούνται κυρίως δεδομένα από δορυφόρους.

Οι μαθηματικοί υπολογισμοί στηρίζονται σε ένα σύστημα μη γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων, που δεν έχουν αναλυτική λύση. Ωστόσο μπορεί να υπολογιστεί μια αριθμητική λύση και για λόγους ευστάθειας πρέπει να υπολογίζονται λύσεις για κάθε μικρό χρονικό βήμα. Επίσης χρησιμοποιείται ένα πλέγμα με κόμβους ανάμεσα στους σταθμούς και οι υπολογισμοί γίνονται ξεχωριστά για κάθε κόμβο.

Με τη σύγχρονη υπολογιστική ισχύ, μπορούν να υπολογιστούν πλέγματα διαστάσεων έως και λίγων χιλιομέτρων. Ωστόσο και σε αυτή την κλίμακα, ορισμένες ατμοσφαιρικές διαδικασίες δεν μπορούν να αναλυθούν όπως τοπικές θερμικές καταιγίδες, ρεύματα επιτάχυνσης πχ. μέσα από κοιλάδες, πάνω από μικρούς λόφους και όλες οι τοπικές επιδράσεις/ παρεμβολές από κτίρια, δενδροφύτευση κλπ.

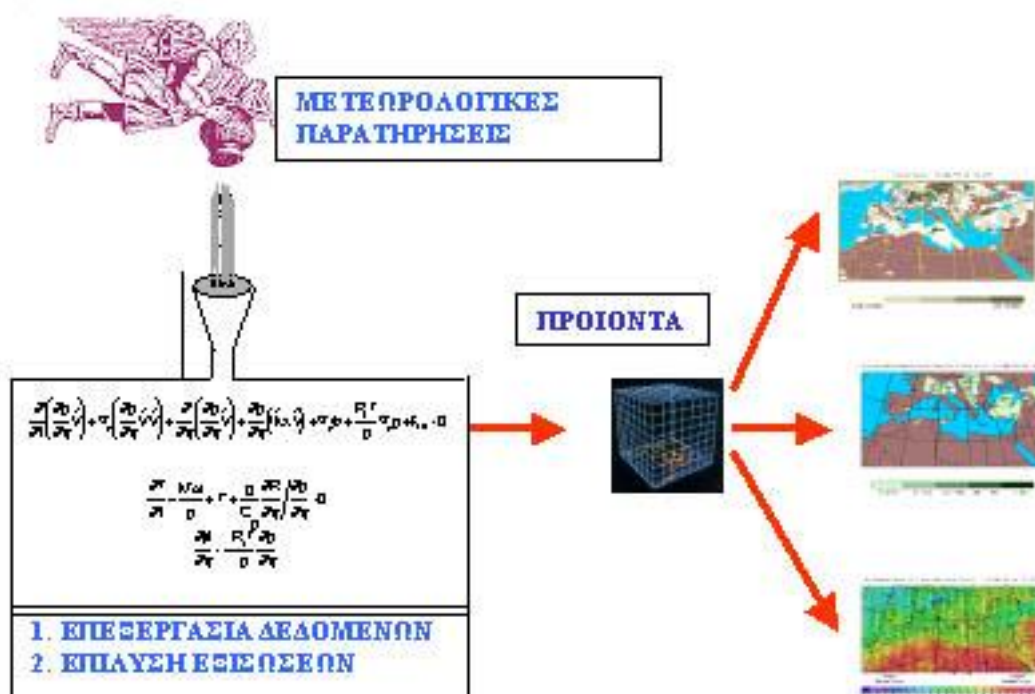
Ο ορίζοντας πρόβλεψης των μετεωρολογικών ινστιτούτων είναι κυρίως για 48 ώρες, αλλά μπορεί να έχουμε προβλέψεις για 72 ώρες ή ακόμη και για 120 ώρες που μας παρέχουν ορισμένα ινστιτούτα.

Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα βήματα σχεδιασμού του μοντέλου, η εφαρμογή του και η δοκιμή του. Τα σημαντικότερα από αυτά τα στάδια θα καθορίσουν τους στόχους, την μελέτη της μοντελοποίησης, την επιλογή των καταλλήλων αλγόριθμων, την λήψη ικανοποιητικών στοιχείων εισαγωγής και εκπομπής, την σύγκριση των προβλέψεων του μοντέλου με τα στοιχεία και την ανάλυση των αποτελεσμάτων. (www.hnms.gr)

2.3.1 Βήματα για τον ορισμό του μοντέλου

Ο σχεδιασμός του μοντέλου, η εφαρμογή και η δοκιμή του απαιτούν κάποιες διαδικασίες (σχήμα 2.4). Αυτές είναι οι εξής:

1. Κατανόηση και καθορισμός του προβλήματος
2. Καθορισμός της χωρικής και χρονικής κλίμακας
3. Καθορισμός της διάστασης του μοντέλου
4. Επιλογή των φυσικών, χημικών και δυναμικών διαδικασιών για την προσομοίωση
5. Επιλογή μεταβλητών εξόδου
6. Καθορισμός των αρχικών και οριακών συνθηκών
7. Λήψη των δεδομένων εισόδου
8. Τεστ ευαισθησίας και ανάλυση των αποτελεσμάτων



Σχήμα 2.4. Βασικά μέρη ενός αριθμητικού μοντέλου πρόγνωσης καιρού. Πηγή (www.hnms.gr)

2.3.2 Καθορισμός του προβλήματος

Ένα μοντέλο αριθμητικής πρόγνωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς εφόσον έχει καθοριστεί το επιστημονικό πρόβλημα που θέλει να μελετηθεί για μια περιοχή ενδιαφέροντος. Μερικά από αυτά τα επιστημονικά ζητήματα είναι τα εξής:

- Συγκεντρώσεις αερολυμάτων
- Πεδία υγρασίας και θερμοκρασίας
- Υγρασία εδάφους
- Καιρικά φαινόμενα
- Συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα και όζοντος
- Εκπομπές και συγκεντρώσεις ρύπων

Εφόσον έχει καθοριστεί το επιστημονικό πρόβλημα είναι πολύ βασικό να καθοριστούν οι υπολογιστικές απαιτήσεις για την επίλυση του προβλήματος όπως επίσης και να γίνει η επιλογή των αποδοτικότερων υπολογιστών, από άποψη ταχύτητας και μνήμης, και να αναπτυχθούν οι υπολογιστικές και οι αριθμητικές τεχνικές επίλυσης (Γκίκας 2004).

2.3.3 Καθορισμός της διάστασης του μοντέλου

Το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός για το τι είδος μοντέλου απαιτείται, σε ότι αφορά τη διάσταση του. Τα τρισδιάστατα μοντέλα είναι τα καταλληλότερα, αλλά επειδή τέτοια μοντέλα απαιτούν τεράστια υπολογιστική υποδομή, ερευνητικά μπορεί να χρησιμοποιηθούν και μοντέλα μηδενικής διάστασης, μονοδιάστατα και δισδιάστατα.

Ένα μοντέλο μηδενικής διάστασης (0-D) είναι ένα “μοντέλο κουτί” (box model) στο οποίο εμφανίζονται χημικοί και φυσικοί μετασχηματισμοί. Τα αέρια και τα σωματίδια μπορούν να εισαχθούν ή να εξέλθουν από οποιαδήποτε πλευρά του μοντέλου. Ένα τυποποιημένο “μοντέλο κουτί” έχει σταθερό διάστημα. Ένα “μοντέλο σωματιδίου” (parcel model) είναι ένα “μοντέλο κουτί” το οποίο κινείται στο διάστημα κατά μήκος της διεύθυνσης του ανέμου.

Ένα μονοδιάστατο μοντέλο (1-D) είναι σαν ένα σύνολο παρακείμενων “μοντέλων κουτιών”, συνήθως τοποθετημένα κάθετα. Τα πλεονεκτήματα ενός κάθετου μονοδιάστατου μοντέλου είναι ότι η ακτινοβολία και η κάθετη μεταφορά μπορούν να προβλεφθούν ικανοποιητικά. Το μειονέκτημα ενός μονοδιάστατου μοντέλου σε σχέση με τα δισδιάστατα ή τα τρισδιάστατα μοντέλα είναι ότι οι κάθετες ταχύτητες

δεν υπολογίζονται σωστά, εξαιτίας του ότι παρεμποδίζουν την οριζόντια μεταβλητή του ανέμου.

Ένα δισδιάστατο μοντέλο (2-D) είναι ένα σύνολο μονοδιάστατων μοντέλων που συνδέονται μεταξύ τους το ένα δίπλα στο άλλο. Τα δισδιάστατα μοντέλα μπορούν να “στηθούν” σε x-y, x-z και y-z επίπεδα. Τα πλεονεκτήματα ενός δισδιάστατου μοντέλου έναντι ενός μονοδιάστατου είναι ότι η μεταφορά μπορεί να απεικονιστεί πιο ρεαλιστικά και μπορεί να γίνει προσομοίωση για μια μεγαλύτερη περιοχή. Ένα παγκόσμιο δισδιάστατο μοντέλο μπορεί να μορφοποιηθεί για οποιαδήποτε περιοχή του πλανήτη. Οι άνεμοι σε ένα τέτοιο μοντέλο μπορούν να προβλεφθούν ή να υπολογιστούν από τις παρατηρήσεις σε κάθε γεωγραφικό μήκος και πλάτος και σε κάθε επίπεδο. Οι προγνωστικές ταχύτητες υπολογίζονται από την εξίσωση της κίνησης. Οι διαγνωστικές ταχύτητες υπολογίζονται από τις προγνωστικές εξισώσεις για τις οριζόντιες και κάθετες ταχύτητες, από όπου εξάγεται η μέση ζωνική ταχύτητα από την εξίσωση συνέχειας για τον αέρα.

Ένα τρισδιάστατο μοντέλο (3-D) είναι ένα σύνολο από οριζόντια δισδιάστατα μοντέλα όπου είναι σε επίπεδα το ένα επάνω στο άλλο. Το πλεονέκτημα του έναντι στα δισδιάστατα μοντέλα είναι ότι η δυναμική και η μεταφορά μπορούν να περιγραφούν πιο ρεαλιστικά. Το μειονέκτημα του είναι ότι απαιτεί περισσότερο υπολογιστικό χρόνο και μνήμη από ότι ένα δισδιάστατο μοντέλο (Γκίκας 2004).

2.3.4 Επιλογή διαδικασιών για την προσομοίωση του μοντέλου

Ένα σημαντικό βήμα στην μοντελοποίηση είναι η επιλογή των φυσικών, χημικών, και δυναμικών εξισώσεων και τα καλύτερα διαθέσιμα “εργαλεία” για την επίλυση τους. Ένα ιδανικό μοντέλο περιλαμβάνει κάθε κατανοητή διαδικασία, η οποία μπορεί να προσομοιωθεί με τον ακριβέστερο τρόπο επίλυσης. Επειδή η ταχύτητα και η μνήμη των υπολογιστών είναι περιορισμένη, ο αριθμός των διαδικασιών προσομοίωσης και η ακρίβεια των λύσεων πρέπει να είναι περιορισμένη.

Έξι σημαντικές ομάδες διαδικασιών που προσομοιώνονται στα ατμοσφαιρικά μοντέλα είναι (1) μετεωρολογικά φαινόμενα, (2) μεταφορά, (3) σύννεφα, (4) ακτινοβολία, (5) αέρια, (6) αερολύματα. Όταν ένα μοντέλο “κατασκευάζεται”, είναι απαραίτητη η επιλογή για το εάν μια ή περισσότερες από τις παραπάνω ομάδες μπορούν να αποκλειστούν από την προσομοίωση ή να αντικατασταθούν από τις παρατηρήσεις.

2.3.5 Επιλογή μεταβλητών

Μετά την επιλογή των διαδικασιών του μοντέλου γίνεται η επιλογή των μεταβλητών. Εάν το μοντέλο χρησιμοποιείται για την πρόγνωση καιρού, μερικές από τις μεταβλητές που απαιτούνται είναι η θερμοκρασία αέρα, η πίεση του αέρα, η πυκνότητα του αέρα, η οριζόντια ταχύτητα, η κάθετη ταχύτητα, το γεωδυναμικό ύψος, η αναλογία μίγματος της μάζας του εξατμιζόμενου νερού, η αναλογία μίγματος της μάζας της υγρασίας. Οι μεταβλητές εναλλάσσονται με γνώμονα το τι εξετάζει το μοντέλο και αναφέρονται στις παραμέτρους ενδιαφέροντος.

2.3.6 Χρονικό βήμα και προγνωστικός ορίζοντας

Η επιλογή του χρονικού βήματος και του προγνωστικού ορίζοντα είναι το επόμενο βήμα στην ανάπτυξη του μοντέλου. Τα κριτήρια επιλογής γίνονται με βάση την αναγκαιότητα ευστάθειας, την επιθυμητή ακρίβεια και τις υπολογιστικές χρονικές απαιτήσεις καθώς επίσης και τις υπολογιστικές δυνατότητες.

2.3.7 Δομή περιοχής του πλέγματος

Τα μοντέλα μέσης κλίμακας μπορούν να έχουν δύο ή τρία συστήματα συντεταγμένων. Επιπλέον, τα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε οι εξαρτώμενες μεταβλητές να αξιολογούνται σε συγκεκριμένα σημεία του πλέγματος (grid points) ή οι μέσοι όροι των εξαρτώμενων μεταβλητών για κάθε ένα στρώμα. Ο υπολογισμός του μέσου όρου είναι μια συνάρτηση του τύπου:

$$\langle \Phi \rangle = \int_z^{z+\delta h} \bar{\Phi} dz / \delta h$$

όπου το $\bar{\Phi}$ είναι ο μέσος όρος του βάθους του στρώματος.

Παρακάτω αναφέρονται παραδείγματα μοντέλων μέσης κλίμακας και των χωρικών διαστάσεων τους.

- Σύστημα συντεταγμένων x-y. Σε αυτό τον σχηματισμό, οι εξαρτώμενες μεταβλητές υπολογίζονται κατά μέσο όρο για κάθε διακριτό επίπεδο, όπως το πλανητικό οριακό στρώμα, έτσι ώστε η κάθετη μεταβλητή στη σχέση διατήρησης να αφαιρείται.
- Σύστημα συντεταγμένων x-σ. Αυτός ο σχηματισμός χρησιμοποιείται για να παρέχει οριζόντια και κάθετη ανάλυση της μέσης κλίμακας δομής, αλλά χωρίς το “προστιθέμενο κόστος” της δεύτερης οριζόντιας συντεταγμένης. Αυτή η μορφή του συστήματος συντεταγμένων ή κάποια ισότιμη μορφή είναι κατάλληλη μόνο για εκείνα τα χαρακτηριστικά μέσης κλίμακας που έχουν διδιάστατα χαρακτηριστικά και για τη θεωρητική ανάλυση των σχέσεων αρχής διατήρησης. Επιπλέον, ένας σχηματισμός με συμμετρικούς άξονες στον οποίο η ακτίνα r αντικαθιστά το x ως οριζόντια συντεταγμένη χρησιμοποιείται για την καλύτερη προσομοίωση των “περιστροφικών” χαρακτηριστικών γνωρισμάτων της ατμόσφαιρας (π.χ. τυφώνας).

- Σύστημα συντεταγμένων x-y-z. Αυτό είναι το πιο γενικό σύστημα συντεταγμένων και παρέχει την καλύτερη “αντιπροσώπευση” των πραγματικών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων μέσης κλίμακας.

Οι χωρικές κλίμακες των δυνάμεων και των επακόλουθων πεδίων διαταραχής καθορίζουν το απαραίτητο μέγεθος του μοντέλου καθώς επίσης και των διαστημάτων του πλέγματος. Για να αντιπροσωπεύσουν τα συστήματα μέσης κλίμακας κατάλληλα πρέπει να ισχύουν τα εξής:

1. Οι σημαντικές μετεωρολογικές μεταβολές, στις εξαρτώμενες μεταβλητές, που προκαλούνται από δυνάμεις μέσης κλίμακας πρέπει να συμπεριληφθούν μέσα στο μοντέλο.
2. Ο υπολογισμός κατά μέσο όρο του όγκου που χρησιμοποιείται, ώστε να καθοριστούν τα διαστήματα του πλέγματος του μοντέλου, πρέπει να είναι αρκετά μικρός προκειμένου οι δυνάμεις μέσης κλίμακας να αντιπροσωπεύονται με ακρίβεια (Pielke, 2002).

2.3.8 Οριζόντιο πλέγμα

Το μέγεθος πλέγματος που χρησιμοποιείται σε ένα αριθμητικό μοντέλο εξαρτάται από την περιοχή ενδιαφέροντος στην οποία παρατηρούνται φαινόμενα μέσης κλίμακας. Εάν η τοπογραφία της επιφάνειας είναι κυρίαρχος παράγοντας που επιδρά για την εμφάνιση των καιρικών φαινομένων τότε ένα τραχύ έδαφος προφανώς θα απαιτεί ένα μικρό διάστημα μεταξύ των διακριτών σημείων από ότι ένα πιο επίπεδο έδαφος.

Για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών κλιμάκων του εδάφους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η αντιπροσώπευση της τοπογραφίας της επιφάνειας ως συνάρτηση του μήκους κύματος (Γκίκας, 2004).

2.3.9 Κατακόρυφο πλέγμα

Το κατακόρυφο πλέγμα ενός μοντέλου μέσης κλίμακας επιλέγεται για να έχει μεγαλύτερη ανάλυση μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος. Το ομοιόμορφο διάστημα του πλέγματος σε όλα τα επίπεδα δεν είναι γενικά εφικτό, λόγω των περιορισμών εξαιτίας της υπολογιστικής δυνατότητας. Εάν η κατακόρυφη κυκλοφορία είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της διαταραχής, τότε η κλίμακα μήκους της παρέχει μια μέτρηση της απαιτούμενης ανάλυσης του πλέγματος. Η κλίμακα μήκους μιας διαταραχής όταν η επιφάνεια του εδάφους είναι σταθερή είναι μια συνάρτηση του ύψους πάνω από το έδαφος ή συνάρτηση της τοπικής διάτμησης της βαθμίδας της θερμοκρασίας πάνω από εκείνο το επίπεδο. Αντίθετα, όμως, όταν η επιφάνεια του εδάφους είναι ανώμαλη, η αντιπροσώπευση της κλίμακας μήκους παραμένει ως μια συνάρτηση της απόστασης πάνω από το έδαφος το οποίο αφαιρείται από την επιφάνεια. Για το λόγο αυτό, τα μοντέλα μέσης κλίμακας κοντά στο έδαφος έχουν

γενικά τις μικρότερες αυξήσεις πλέγματος, όπου επεκτείνονται προς τα πάνω τα “εγκλωβισμένα” πλέγματα (Γκίκας, 2004).

2.4 Που χρησιμοποιούνται κυρίως τα αριθμητικά μοντέλα

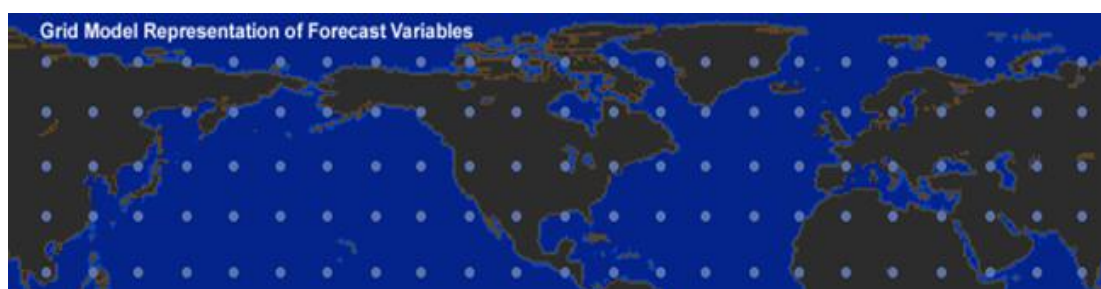
1. Μικρής & Μέσης Χρονικής Κλίμακας και Εποχιακές προγνώσεις καιρού, μοντέλα παγκόσμιας κλίμακας (global models), περιοχικά μοντέλα (regional or limited area models), μοντέλα μέσης κλίμακας (mesoscale models)
2. Κλιματικές προγνώσεις μοντέλα παγκόσμιας κλίμακας, περιοχικά μοντέλα
3. Μελέτες συγκεκριμένων μετεωρολογικών φαινομένων (μοντέλα με πλήρης φυσικές διεργασίες ή ιδεατά μοντέλα)
 - π.χ. μέτωπα, κυκλογένεσις, τοπικοί κυκλώνες
4. Μελέτες μικροκλίμακας
 - πόλεις, δρόμοι (street-canyons)

2.5 Επίλυση εξισώσεων σε σημεία πλέγματος

Τα αριθμητικά μοντέλα επιλύουν προγνωστικά τις εξισώσεις της κίνησης, την θερμοδυναμική εξίσωση, την εξίσωση της υγρασίας και διαγνωστικά την εξίσωση της συνέχειας, με διάφορες παραδοχές για τις φυσικές διεργασίες της ατμόσφαιρας, και κάνοντας χρήση:

- i. Πεπερασμένων διαφορών σε σημεία πλέγματος

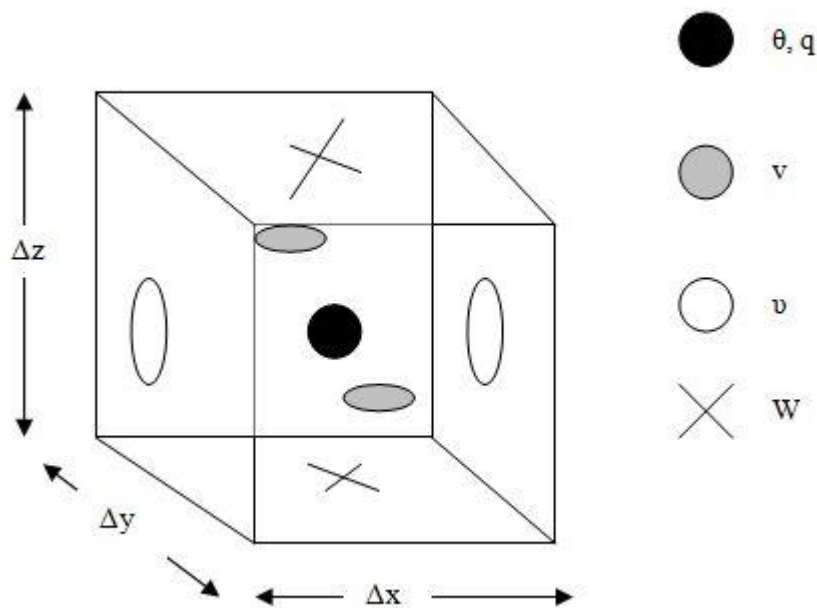
Με αυτή τη μέθοδο οι εξισώσεις επιλύονται προσεγγιστικά σε σημεία πλέγματος (σχήμα 2.5) που είναι ομοιόμορφα ή ανομοιόμορφα κατανεμημένα και καλύπτουν όλη την περιοχή ενδιαφέροντος στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση. Πολύ σημαντική παράμετρος είναι η χωρική ανάλυση του μοντέλου. Δηλαδή, η απόσταση μεταξύ των σημείων πλέγματος.



Σχήμα 2.5: Μοντέλο πλέγμα εκπροσώπηση των προβλέψεων των μεταβλητών Πηγή (www.hnms.gr)

Τα σύγχρονα ατμοσφαιρικά μοντέλα (συμπεριλαμβανομένων των μετεωρολογικών) βασίζονται στην ανάζητηση προσεγγιστικών αριθμητικών λύσεων των θεμελιωδών εξισώσεων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι θεμελιώδεις εξισώσεις περιλαμβάνουν μερικές παραγώγους, η εύρεση μιας προσεγγιστικής λύσης προϋποθέτει τη θεώρηση πεπερασμένων διαφορών (π.χ. μεταβολή της θερμοκρασίας, ΔT) τόσο στο χώρο (Δx , Δy , Δz) όσο και το χρόνο (Δt). Υπό αυτό το πρίσμα, η χρησιμοποίηση αριθμητικών μεθόδων θεωρεί πως κάθε ατμοσφαιρική μεταβλητή μεταβάλλεται με τρόπο πεπερασμένο και διακριτό, χωρικά και χρονικά. Κατά τον τρόπο αυτό, ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο επιλύει το σύστημα των θεμελιωδών εξισώσεων θεωρώντας πως η ατμόσφαιρα αποτελείται από ένα σύνολο πεπερασμένων σημείων. Το σύνολο αυτό των σημείων ονομάζεται πλέγμα του μοντέλου. Αν και η θεώρηση της ατμόσφαιρας με την μορφή πλέγματος αποτελεί παραδοχή που αποκλίνει από την πραγματικότητα (η ατμόσφαιρα είναι συνεχής), εντούτοις είναι απαραίτητη για την πρόγνωση της εξέλιξης της.

Κάθε ατμοσφαιρικό μοντέλο λοιπόν, «βλέπει» την ατμόσφαιρα ως ένα σύνολο πεπερασμένων σημείων, τόσο στην οριζόντια όσο και την κατακόρυφη διεύθυνση. Οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων αυτών κατά την οριζόντια διεύθυνση (Δx , Δy) ορίζουν αυτό που είναι γνωστό ως χωρική ανάλυση του μοντέλου. Αντίστοιχα, η απόσταση μεταξύ των σημείων κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (Δz) ορίζει τη λεγόμενη κατακόρυφη ανάλυση του μοντέλου. Οι τιμές της χωρικής ανάλυσης (Δx , Δy) των μοντέλων κυμαίνονται από εκατοντάδες μέτρα έως εκατοντάδες χιλιόμετρα. Ανάλογα μάλιστα με την χωρική τους ανάλυση, τα ατμοσφαιρικά μοντέλα (ή οι προσομοιώσεις τους) χαρακτηρίζονται ως παγκόσμια τα οποία καλύπτουν όλη την γη και συνήθως είναι περίπου (Δx , $\Delta y > 50$ km) ή μπορεί να είναι και μικρότερο ή μεγαλύτερο, τα υπόλοιπα είναι περιορισμένης περιοχής και είναι περιοχικά (Δx , $\Delta y < 20-30$ km) ή τοπικά (Δx , $\Delta y < 5$ km). Από την άλλη πλευρά, η κατακόρυφη ανάλυση (Δz) των περισσότερων μοντέλων είναι της τάξης των λίγων έως εκατοντάδων μέτρων. Έχοντας ορίσει τα Δx , Δy και Δz , είναι πλέον προφανές ότι η ατμόσφαιρα «χωρίζεται» σε πεπερασμένο αριθμό κυψελίδων, κάθε μία από τις οποίες περικλείει ατμοσφαιρικό αέρα όγκου $V = \Delta x * \Delta y * \Delta z$. Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως δεν είναι απολύτως απαραίτητο, αν και συνηθίζεται, να ισχύει $\Delta x = \Delta y$.



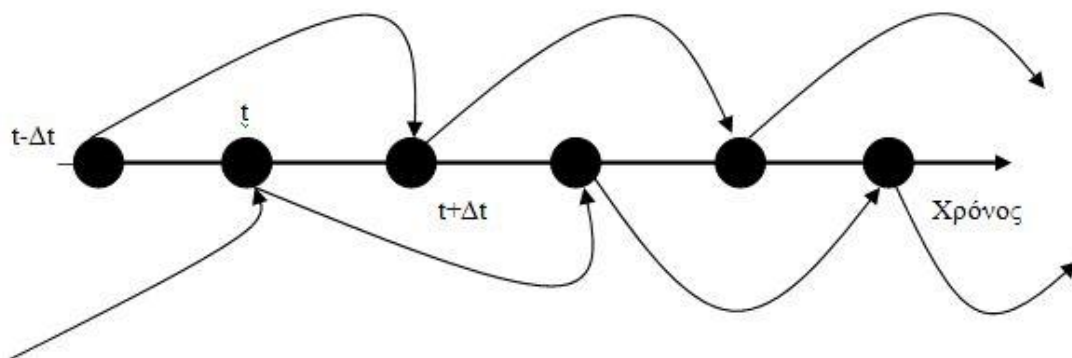
Σχήμα 2.6 : Παράδειγμα κυψελίδας μετεωρολογικού μοντέλου.

(Πηγή: www.theweatherwizard.com)

Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα κυψελίδας κάποιου μετεωρολογικού μοντέλου. Διακρίνονται οι τρεις διαστάσεις (Δx , Δy , Δz), το κέντρο (μαύρος κύκλος) της κυψελίδας, καθώς και τα κέντρα των έξι (6) πλευρών της (λευκοί και γκρι κύκλοι, X). Η επίλυση των θεμελιωδών εξισώσεων με στόχο την εξέλιξη της ατμοσφαιρικής κατάστασης (πρόγνωση) λαμβάνει χώρα σε κάθε μία τέτοια κυψελίδα των μοντέλων (εξ' ου η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών). Οι λεγόμενες θερμοδυναμικές μεταβλητές της ατμόσφαιρας (π.χ. θερμοκρασία, ειδική υγρασία) ορίζονται στο κέντρο κάθε κυψελίδας. Η κατακόρυφη συνιστώσα του ανέμου (w) ορίζεται στην άνω και κάτω πλευρά της κυψελίδας, δίνοντας τη δυνατότητα της προσομοίωσης των κατακόρυφων κινήσεων και ροών. Παρόμοια, οι οριζόντιες συνιστώσες του ανέμου (u , v) ορίζονται στα κέντρα των δύο κάθετων εδρών της κυψελίδας. Με πιο απλά λόγια, μέσω της επίλυσης του συστήματος των θεμελιωδών εξισώσεων ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο προβλέπει την κατάσταση της ατμόσφαιρας κάθε $\Delta x, \Delta y$ km στην οριζόντια διεύθυνση και κάθε Δz στην κατακόρυφη. Στο σημείο αυτό αξίζει να

σημειωθεί πως η ακρίβεια ενός ατμοσφαιρικού μοντέλου εξαρτάται από τη χωρική του ανάλυση, χωρίς ωστόσο η εξάρτηση αυτή να είναι μονοσήμαντη. Γενικότερα, θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε πως όσο μικρότερα είναι τα $\Delta x, \Delta y$, τόσο καλύτερη αναμένεται να είναι μία πρόγνωση. Αν και η συγκεκριμένη διαπίστωση εμπεριέχει αρκετή δόση αλήθειας, εντούτοις υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου η αύξηση της χωρικής ανάλυσης (ελάττωση των $\Delta x, \Delta y$) έχει μικρή θετική ή ακόμα και αρνητική επίπτωση στην ποιότητα μιας αριθμητικής πρόγνωσης.

Τα παραπάνω αναφέρονται στη λεγόμενη χωρική διακριτοποίηση που εφαρμόζουν τα ατμοσφαιρικά μοντέλα. Στον τρόπο δηλαδή με τον οποίο χωρίζουν την ατμόσφαιρα σε ένα σύνολο πεπερασμένων, διακριτών σημείων. Πέρα όμως από τη χωρική διακριτοποίηση, είδαμε πως η εύρεση προσεγγιστικής αριθμητικής λύσης των πρωτογενών εξισώσεων προϋποθέτει και τη χρονική διακριτοποίηση. Για το λόγο αυτό, τα ατμοσφαιρικά μοντέλα εξελίσσουν την ατμοσφαιρική κατάσταση κατά τρόπο όχι συνεχή, αλλά σε πεπερασμένα χρονικά βήματα (Δt). Σε κάθε περίπτωση, ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο ξεκινάει από μία γνωστή αρχική κατάσταση (t_0) και μέσω των θεμελιωδών εξισώσεων την εξελίσσει στη χρονική στιγμή $t_0 + \Delta t$. Στη συνέχεια, οι θεμελιώδεις εξισώσεις επιλύονται για τη νέα ατμοσφαιρική κατάσταση κ.ο.κ. Η συγκεκριμένη πορεία απεικονίζεται με απλουστευμένο τρόπο στο σχήμα 7. Τα βέλη υποδεικνύουν τον τρόπο με τον οποίο ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο «πηδάει» από την μία χρονική στιγμή στην άλλη (εξ' ου το όνομα *leapfrog*, το οποίο αναφέρεται στα άλματα ενός βατράχου). Όπως φαίνεται, το μοντέλο ξεκινάει από μία παρελθούσα χρονική στιγμή $t - \Delta t$ για να προβλέψει την ατμοσφαιρική κατάσταση τη χρονική στιγμή $t + \Delta t$. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα είδος επαναληπτικού βρόχου επίλυσης των πρωτογενών εξισώσεων, έως ότου το μοντέλο φτάσει στην επιθυμητή χρονική στιγμή (πέρας αριθμητικής πρόγνωσης). Καθίσταται επίσης προφανές πως η αριθμητική πρόγνωση αποτελεί, κατά τρόπο θεμελιώδη, πρόβλημα αρχικών συνθηκών. Δίχως αρχικές συνθήκες είναι αδύνατο να υπάρξει πρόγνωση (σχήμα 2.7) (Pielke, 2002).



Σχήμα 2.7. Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου «leapfrog».

Πηγή(www.theweatherwizard.com)

ii. 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.

2.6 Ενέργειες για την πραγματοποίηση αριθμητικής πρόγνωσης

Μέχρι αυτό το σημείο, μπορούμε να συνοψίσουμε την πορεία υλοποίησης μια αριθμητικής προγνώσης ως εξής:

1. Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων για τον παρελθόντα καιρό.

Τα δεδομένα αυτά μπορεί να προέρχονται είτε από πραγματικές παρατηρήσεις (αναλύσεις), είτε από κάποιο άλλο μοντέλο μεγαλύτερης κλίμακας (π.χ. από πλανητικής κλίμακας πρόγνωση, μπορεί να ξεκινήσει μια περιοχική).

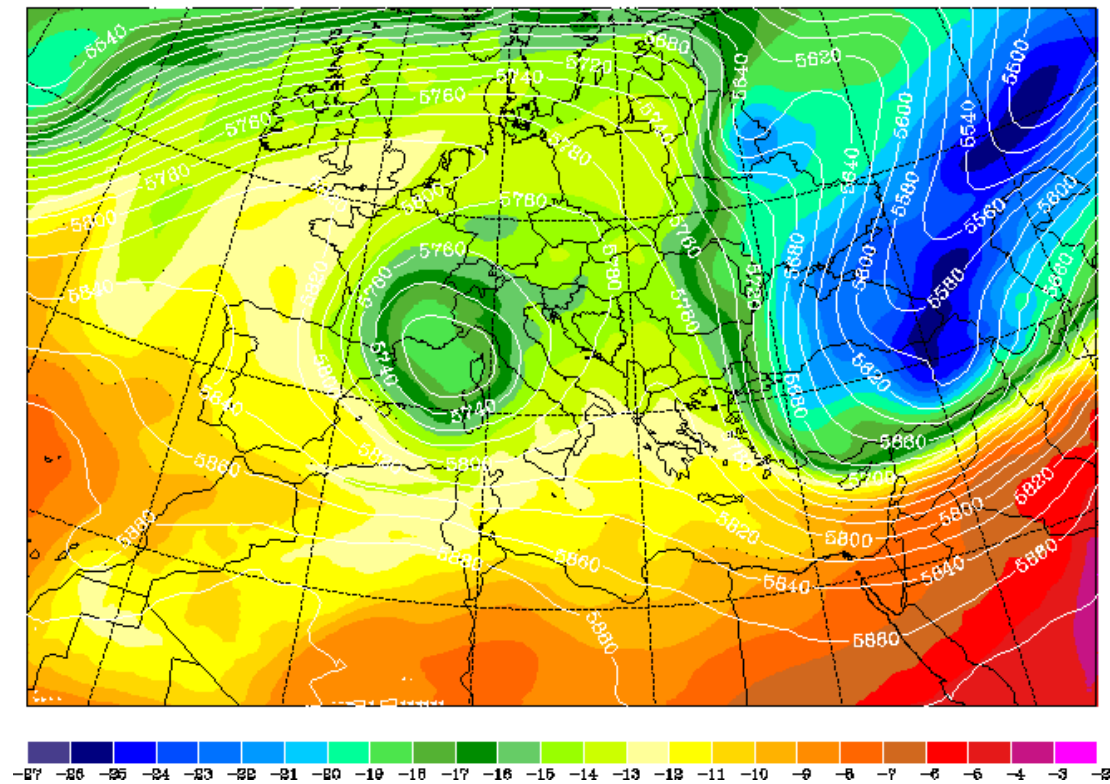
2. «Εισαγωγή» των δεδομένων του παρελθόντα καιρού στο αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης. Στο στάδιο αυτό λαμβάνει χώρα η λεγόμενη αρχικοποίηση του μοντέλου, η δημιουργία δηλαδή των αρχικών και οριακών συνθηκών, η εξέλιξη των οποίων θα δώσει τελικά την πρόγνωση.

3. Έναρξη του μοντέλου και ολοκλήρωση των αρχικών του συνθήκων. Με τον όρο ολοκλήρωση αναφερόμαστε στην επίλυση του συστήματος των πρωτογενών εξισώσεων (μαθηματική ολοκλήρωση, αφού οι εξισώσεις είναι διαφορικές) με τις αριθμητικές μεθόδους που περιγράφηκαν παραπάνω.

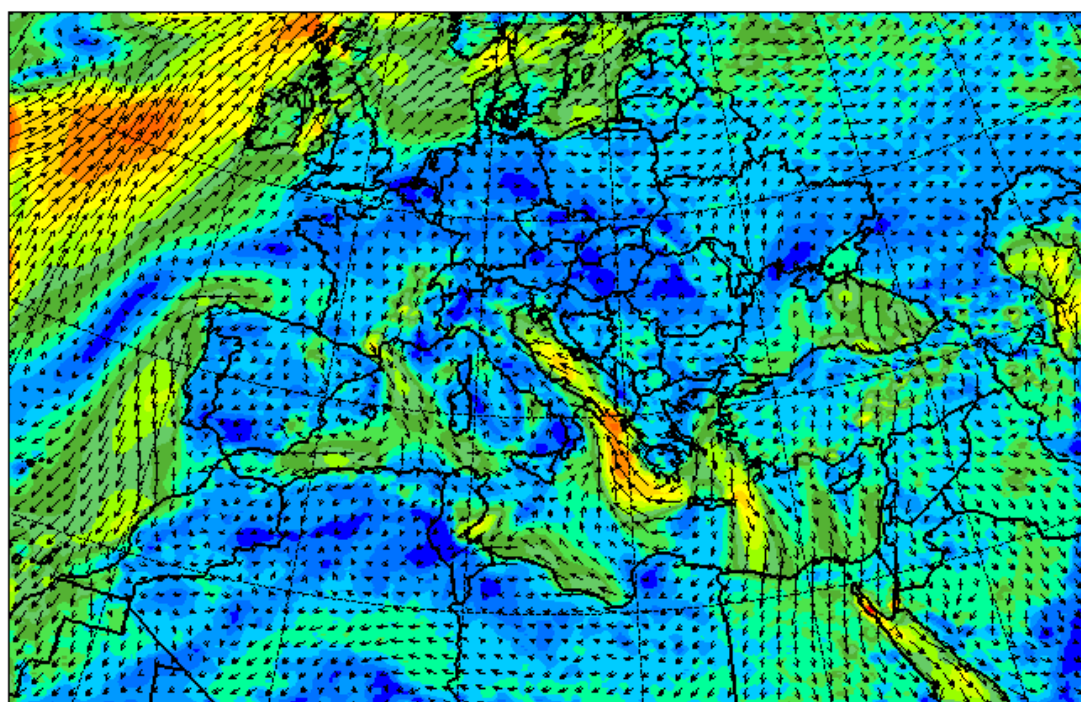
Στα παραπάνω 3 βήματα-στάδια, θα πρέπει κανείς να προσθέσει διάφορα «υπο-βήματα» και «υπο-στάδια» που αποτελούν τις «λεπτομέρειες» που μπορούν να διαφοροποιήσουν το αποτέλεσμα μιας αριθμητικής πρόγνωσης. (www.hnms.gr)

2.7 Παραδείγματα Προϊόντων Αριθμητικών Μοντέλων Πρόγνωσης Του Καιρού

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα τυπικά πεδία που υπάρχουν ερευνητικά ή επιχειρησιακά για την ανάλυση και πρόγνωση του καιρού. Από την αριθμητική πρόγνωση καιρού του τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης παραθέτονται τα εξής τυπικά πεδία της 06/10/2013 για 18 UTC από το αριθμητικό μοντέλο Skiron. Στο χάρτη (σχήμα 2.8) στα 500 HPA παρατηρούμε την εμφάνιση ενός χαμηλού πάνω από την περιοχή ΒΔ της Ιταλίας αφού η τιμή των γεωδυναμικών υψών είναι σχετικά χαμηλή και αυξάνει όσο απομακρυνόμαστε από την περιοχή αυτή. Στο χάρτη (σχήμα 2.9) παρατηρούμε την κατεύθυνση του ανέμου, όπου πάνω από την περιοχή του Ιονίου πέλαγος έχουμε ΝΝΑ ανέμους. Στο χάρτη (σχήμα 2.10) παρουσιάζεται η νεφοκάλυψη πάνω από την περιοχή της Ευρώπης. Παρατηρούμε ότι στην περιοχή της Δυτικής Ελλάδας και στο Ιόνιο να εμφανίζετε υψηλή νεφοκάλυψη, καθώς και στο μεγαλύτερο τμήμα της Μεσογείου.



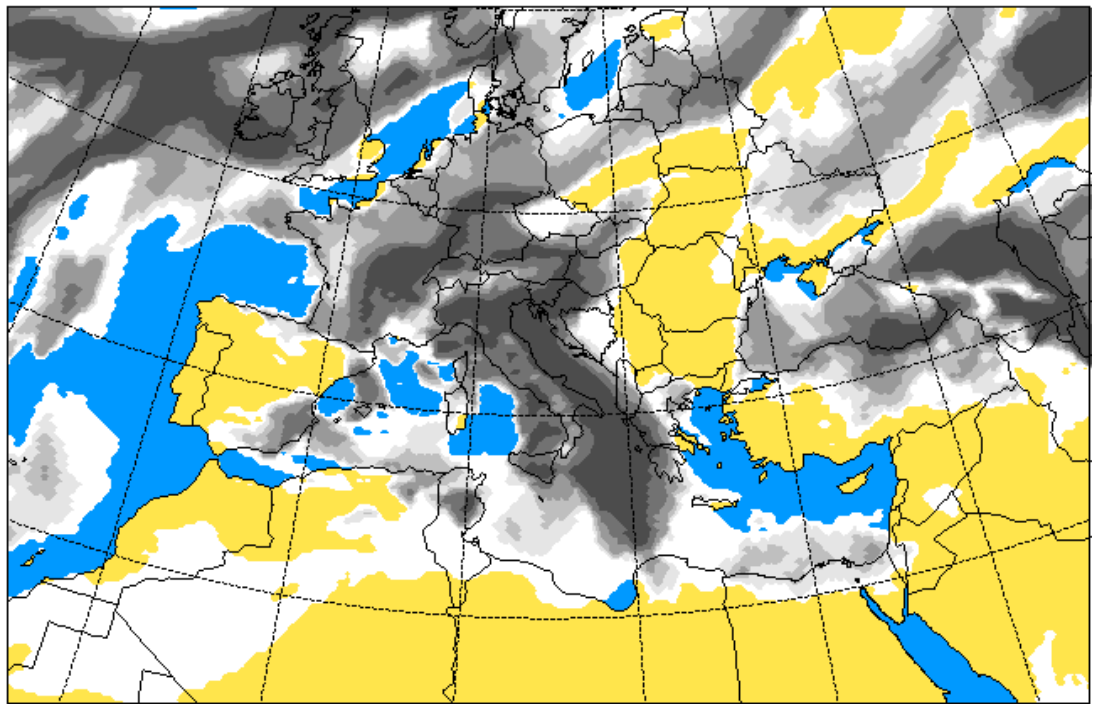
Σχήμα 2.8 : Χάρτης της θερμοκρασίας στα 500HPa. Πηγή (<http://meteo.geo.auth.gr>)



0. 1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16. 17. 20.

Σχήμα 2.9 : Χάρτης Θερμοκρασίας στα 2 μ και ανέμου στα 10 μ. Πηγή:

(<http://meteo.geo.auth.gr>)



HIGH CLOUDS

LOW CLOUDS

Σχήμα 2.10 : Χάρτης νεφοκάλυψης. Πηγή (<http://meteo.geo.auth.gr>)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Περιγραφή επιχειρησιακών αριθμητικών μοντέλων

3.1 Μοντέλο Πρόβλεψης Καιρού WRF

Το Μοντέλο WRF είναι ένα από τα αριθμητικά πρότυπα που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως στην πρόγνωση του καιρού. Η λειτουργία του έχει ως σκοπό στην αριθμητική επίλυση μαθηματικών εξισώσεων με τη βοήθεια προσεγγιστικών μεθόδων στηριζόμενες σε θεωρίες που καταλαμβάνει κυρίως ο κλάδος της Φυσικής. Η ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας εξαρτάται από την ύπαρξη κάποιων αρχικών και οριακών συνθηκών οι οποίες παίρνονται από μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε πραγματικό χρόνο στην ατμόσφαιρα με την βοήθεια των διαφόρων μετεωρολογικών οργάνων και από προγνώσεις παγκοσμίων μοντέλων. Στις περιοχές αυτές όπου δεν είναι δυνατή η πραγματοποίηση μετρήσεων από τον άνθρωπο, όπως είναι για παράδειγμα οι ωκεανοί, χρησιμοποιούνται μετρήσεις από δορυφόρους. Μετά την επεξεργασία των δεδομένων αυτών από το μοντέλο, δημιουργούνται οι προγνωστικοί χάρτες καιρού με την βοήθεια ενός λογισμικού οπτικοποίησης.

Το μοντέλο πρόβλεψης καιρού WRF είναι ένα σύστημα πρόβλεψης καιρικών φαινομένων μέσης κλίμακας, το οποίο έχει γνωρίσει μεγάλη εξέλιξη τα τελευταία χρόνια. Έχει σχεδιαστεί με σκοπό να εξυπηρετήσει την έρευνα της ατμόσφαιρας, της επιφάνειας της γης, των ωκεανών αλλά επίσης βρίσκει απήχηση και σε πολλές άλλες εφαρμογές. Η δομή του είναι τέτοια έτσι ώστε να μπορεί να επεκταθεί εύκολα αφού αποτελείται από δυναμικά επιμέρους κομμάτια. Η καινοτομία αυτή το κάνει να είναι εύχρηστο όχι μόνο για πραγματική εφαρμογή αλλά και για ένα ευρύ φάσμα πειραματισμού. Κάποιος μπορεί να προσθέσει εύκολα κομμάτια που χρησιμεύουν για τις ανάγκες του. Επίσης είναι σχεδιασμένο να εκμεταλλεύεται την δυνατότητα παράλληλης επεξεργασίας δεδομένων κάποιων συστημάτων, πραγματοποιώντας πράξεις παράλληλα. Ο αυξανόμενος αριθμός επεξεργαστών αυξάνει και την ταχύτητα του μοντέλου. Επίσης η απόδοση του μοντέλου είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνεται και η ταχύτητα του δικτύου όπου λειτουργούν οι επεξεργαστές.

Αυτό το μοντέλο δίνει στους ερευνητές τη δυνατότητα να κάνουν προσομοιώσεις που να αντιπροσωπεύουν, τόσο τα πραγματικά όσο, και ιδεατά δεδομένα. Με αυτό τον τρόπο οι ερευνητές μπορούν να έχουν αποτελέσματα για διάφορα ενδεχόμενα και μπορούν να κάνουν καλύτερη πρόβλεψη για μελλοντικά γεγονότα καθώς επίσης και να επεξηγήσουν καλύτερα φαινόμενα, τα οποία συνέβησαν στο παρελθόν. Επίσης μπορούν να πραγματοποιήσουν προσομοιώσεις σε βάθος χρόνου ανακαλύπτοντας συσχετισμούς σε καταστάσεις και διάφορα καιρικά φαινόμενα. Το μοντέλο αυτό πρόβλεψης είναι ευέλικτο και αποδοτικό υπολογιστικά όσον αφορά την επεξεργασία των δεδομένων και επιπλέον αυξάνει τις δυνατότητες της πρόγνωσης. Έτσι το μοντέλο παρέχει πιο αξιόπιστη και έγκαιρη πρόβλεψη. Ωστόσο, οι χρήστες του μοντέλου αυτού συνεχώς αυξάνονται καθώς επίσης βελτιώνεται η λειτουργικότητά του και οι δυνατότητές του. Η συνεχής πληροφόρηση που παίρνουν οι χρήστες για το πώς να αξιοποιήσουν πιο αποτελεσματικά το μοντέλο αυτό έχει οδηγήσει σε αυξημένες απαιτήσεις και γρήγορη ανάπτυξη. (www.wrf-model.org)

3.1.1 Πως δημιουργήθηκε το WRF

Το WRF τώρα είναι σε λειτουργία στο Εθνικό Κέντρο Περιβαλλοντικών Προβλέψεων (NCEP-National Centers of Environmental Prediction). Το μοντέλο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ελεύθερα από όλους. Η ανάπτυξή του ήταν ένα αποτέλεσμα της συνεργασίας των πιο κάτω οργανισμών:

- ❖ του National Center for Atmospheric Research (NCAR),
- ❖ του National Oceanic and Atmospheric Administration
- ❖ του Air Force Weather Agency (AFWA),
- ❖ του Naval Research Laboratory,
- ❖ του University of Oklahoma, και
- ❖ του Federal Aviation Administration (FAA).

3.1.2 Χρήση του μοντέλου WRF

Το μοντέλο είναι κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί για ευρείας χρήσης εφαρμογές που είναι όμως περιορισμένης έκτασης συμπεριλαμβανομένου και:

- ❖ Ιδεατή προσομοίωση (π.χ. διάδοση θερμότητας με ρεύματα)
- ❖ Περιοχικές ή παγκόσμιες εφαρμογές
- ❖ Οριοθετημένη έρευνα
- ❖ Έρευνες για αφομοίωση δεδομένων
- ❖ Έρευνες πρόγνωσης
- ❖ Εφαρμογές πολλαπλών μοντέλων
- ❖ Εκπαίδευση

Το Μετεωρολογικό Τμήμα Μέσης και Μικρής Κλίμακας της NCAR συντηρεί τώρα και υποστηρίζει ένα υποσύνολο του όλου κώδικα WRF, τρίτης έκδοσης το οποίο συμπεριλαμβάνει:

- Advanced Research WRF (ARW) dynamic solver,
- WRF Pre-Processing System (WPS),
- WRF-Var data assimilation system,
- Διάφορα πακέτα φυσικής που έχουν συνεισφέρει στο Εθνικό Κέντρο Ατμοσφαιρικής Έρευνας (NCAR) το οποίο λειτουργείται από το Πανεπιστημιακό Ίδρυμα Ατμοσφαιρικής Έρευνας UCAR (University Corporation for Atmospheric Research).

Μοντέλο WRF-NMM:

Στο Τμήμα της Γεωγραφίας του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου Αθηνών από το Δεκέμβριο του 2007 έχει εγκατασταθεί στις υπολογιστικές εγκαταστάσεις του, το μη υδροστατικό μοντέλο WRF/NMM ver3.0 που είναι περιορισμένης περιοχής. Το WRF-NMM αναπτύχθηκε από την Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (NOAA) και τα Εθνικά Κέντρα Περιβαλλοντικής Πρόβλεψης (NCEP). Η πραγματοποίηση του μοντέλου γίνεται καθημερινά και παράγει 120 ωρών (5 ημερών) πρόγνωση καιρού για την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία αποτελεί ένα αξιόπιστο σύστημα με σχετικά περιορισμένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ για την εκτίμηση ατμοσφαιρικών φαινομένων σε τοπικό επίπεδο (όπως συστήματα κατακορύφου ανάπτυξης, συνοπτική και υποσυνοπτική κυκλοφορία κτλ). Το μοντέλο αυτό πραγματοποιεί προγνώσεις σε πεδίο

ολοκλήρωσης 305x273 σημείων πλέγματος, με 0.09°x0.09° οριζόντια ανάλυση (~10 km), χρονικό βήμα ολοκλήρωσης 24sec και 38 κατακόρυφα επίπεδα μέχρι τα 25 mb.

Όσον αφορά για την τοπογραφία χρησιμοποιείται η βάση δεδομένων USGS DEM (30°x30°), για τη χρήση της γης σε 24 κατηγορίες του USGS (30x30sec) και για το είδος εδάφους χρησιμοποιούνται οι 16 κατηγορίες του FAO (30°x30°). Επίσης, για την επιφανειακή θερμοκρασία θάλασσας χρησιμοποιούνται τα ημερήσια παγκόσμια δεδομένα σε του NCEP 0.083°x0.083° ανάλυση. Οι αρχικές και οριακές συνθήκες προέρχονται από το παγκόσμιο προγνωστικό σύστημα GFS/NCEP σε ανάλυση 0.5°x0.5°. Και τέλος έχουν αναπτυχθεί κατάλληλοι αλγόριθμοι για την μορφοποίηση των αποτελεσμάτων σε GRIB/GRIB2/NETCDF ενώ η ακολουθούμενη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων είναι JPG/PNG.

3.2 Το Σύστημα Πρόγνωσης Καιρού ΠΟΣΕΙΔΩΝ

Αποτελεί ένα επιχειρησιακό σύστημα το οποίο έχει ως σκοπό να παρέχει εξειδικευμένες μετρήσεις και προγνώσεις για τις περιβαλλοντικές συνθήκες των Ελληνικών Θαλασσών και της Μεσογείου.

Το σύστημα πρόγνωσης καιρού ΠΟΣΕΙΔΩΝ (σχήμα 3.1) εξελίχτηκε στα πλαίσια του προγράμματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ-Ι την χρονική περίοδο 1997-2000. Ως αρχικός στόχος ήταν ο σχεδιασμός ενός φερέγγυου και υπολογιστικά αποτελεσματικού συστήματος με σκοπό τη δημιουργία υψηλής ακρίβειας δεδομένων, τα οποία θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμα τόσο για την πρόγνωση των τοπικών ατμοσφαιρικών συνθηκών όσο και για την τροφοδοσία των προγνωστικών κυματικών και υδροδυναμικών μοντέλων αλλά και του προγνωστικού μοντέλου οικοσυστήματος του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ με αναλυτικά πεδία επιφανειακών ροών ορμής, υγρασίας, θερμότητας, ακτινοβολίας (μικρού και μεγάλου μήκους κύματος) και βροχόπτωσης. Με τη δυνατότητα της λειτουργίας των επάλληλων πλεγμάτων (Paradopoulos et al., 2002) αυτό το σύστημα πρόγνωσης καιρού από τον Οκτώβριο 1999 αποτελεί ένα επιχειρησιακό σύστημα, το οποίο παρέχει τριήμερες (72 ώρες) προγνώσεις καιρού για δύο διαφορετικές περιοχές με διαφορετική ευκρίνεια (1/10°x1/10° - (10χλμ) και 1/4°x1/4° - (25 χλμ)). Το μεγαλύτερο τμήμα της Ευρώπης, της Μεσογείου και της Βόρειας Αφρικής καταλαμβάνει το αραιό πλέγμα, ενώ την Ανατολική Μεσόγειο καταλαμβάνει το πυκνό πλέγμα. Το σύστημα SKIRON/Eta (Kallos et al., 1997) αποτελεί την κεντρική συνιστώσα του συστήματος, όπου πρόκειται για μια τροποποιημένη έκδοση του ατμοσφαιρικού μοντέλου Eta/NCEP και είναι συνδεδεμένο με ένα μοντέλο πρόγνωσης του κύκλου της εδαφικής σκόνης στην ατμόσφαιρα (Nickovic et al., 2001).

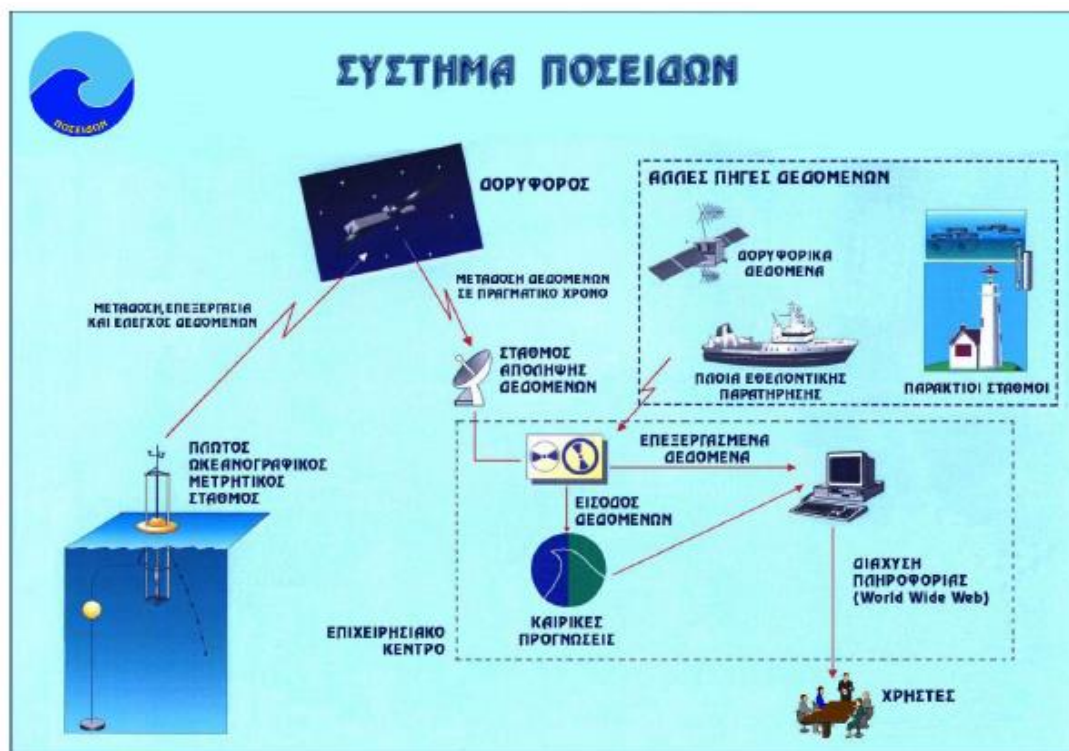
Ωστόσο, πραγματοποιήθηκαν διάφορες βελτιώσεις/τροποποιήσεις κατά τη διάρκεια της επιχειρησιακής λειτουργίας του συστήματος. Όμως, επιτεύχθηκε η σημαντικότερη αναβάθμιση του συστήματος στα πλαίσια του προγράμματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ-II (2005-2008) και σε συνεργασία με την Ομάδα Ατμοσφαιρικών Μοντέλων και Πρόγνωσης Καιρού του Πανεπιστημίου Αθηνών, στην οποία συμπεριλαμβάνονται:

(α) η εγκατάσταση της τελευταίας μη υδροστατικής έκδοσης του ατμοσφαιρικού μοντέλου SKIRON/Eta (Janjic et al., 2001),

(β) η ανάπτυξη μοντέρνων σχημάτων παραμετροποίησης των κύριων φάσεων του κύκλου ζωής της εδαφικής σκόνης με σκοπό την εκτίμηση των διεργασιών παραγωγής, διάχυσης, μεταφοράς και εναπόθεσης, όπου λαμβάνεται υπόψη η κατανομή διαφορετικών μεγεθών σωματιδίων σκόνης (Kallos et al., 2006),

(γ) η εφαρμογή ενός τρισδιάστατου πακέτου αφομοίωσης δεδομένων, του Local Analysis Prediction System (LAPS), για την ανάπτυξη πεδίων ανάλυσης υψηλής ευκρίνειας. Τα GFS/NCEP πεδία ανάλυσης παγκόσμιας κάλυψης με ευκρίνεια $1/2^\circ \times 1/2^\circ$ (~ 55 χλμ) χρησιμοποιούνται από το σύστημα LAPS για να δημιουργήσει τρισδιάστατα πεδία πρώτης εκτίμησης. Στη συνέχεια αφομοιώνει όλες τις διαθέσιμες επιφανειακές και ανώτερης ατμόσφαιρας παρατηρήσεις πραγματικού χρόνου, και στο τέλος δημιουργεί πεδία ανάλυσης υψηλής ευκρίνειας (περίπου 15 χλμ) όπου χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των αρχικών συνθηκών του ατμοσφαιρικού μοντέλου. Τα προγνωστικά πεδία GFS/NCEP χρησιμοποιούνται για τις πλευρικές συνθήκες, τα οποία ανά 3 ώρες είναι διαθέσιμα και σε ανάλυση $1/2^\circ \times 1/2^\circ$.

Το σύστημα πρόγνωσης καιρού ΠΟΣΕΙΔΩΝ-II (Papadopoulos & Kats , 2009) από το Δεκέμβριο 2007 άρχισε την επιχειρησιακή του λειτουργία και προσαρμόζεται με οριζόντια ανάλυση $1/20^\circ \times 1/20^\circ$ (~5 km) σε μια εκτεταμένη περιοχή όπου καταλαμβάνει την ευρύτερη περιοχή της Μεσόγειου, της Μαύρης Θάλασσας και μεγάλο μέρος της Βόρειας Αφρικής και της Ασίας. Στο κατακόρυφο χρησιμοποιούνται 50 επίπεδα που προεκτείνονται μέχρι το ύψος των 25 mb (~25 km). Επίσης από το NCEP χρησιμοποιούνται δεδομένα ανάλυσης υψηλής ευκρίνειας ($1/2^\circ \times 1/2^\circ$) με σκοπό τον υπολογισμό της θερμοκρασίας, της επιφάνειας της θάλασσας, του πάχους χιονιού και της κάλυψης από τον πάγο. Η διάρκεια προσομοίωσης έχει επεκταθεί σε 120 ώρες (5 ημέρες).



Σχήμα 3.1 Σύστημα Ποσειδών

Πηγή: <http://www.life-medponds.gr/pikrodafni/Papadopoulos.pdf>

3.3 Μοντέλο SKIRON

Το μετεωρολογικό σύστημα SKIRON χρησιμοποιείται κυρίως στην Ομάδα Ατμοσφαιρικών Μοντέλων και Πρόγνωσης καιρού του Πανεπιστημίου Αθηνών (<http://forecast.uoa.gr>) και στην ελληνική Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ), στα πλαίσια του έργου "Ανάπτυξη ενός συστήματος πρόγνωσης καιρού μεγάλης ακρίβειας σε υπολογιστές υψηλών επιδόσεων" το οποίο, χρηματοδοτήθηκε για πρόγνωση καιρού τοπικού χαρακτήρα από την Ελληνική Κυβέρνηση και την Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω του προγράμματος ΕΠΕΤ II της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας. Το σύστημα αυτό για να μπορέσει να εφαρμοστεί χρειάζεται περιβάλλον Unix/Linux και μετεωρολογικά δεδομένα εισαγωγής.

Ουσιαστικά, το μοντέλο SKIRON αποτελεί την εξέλιξη του μοντέλου ETA, το οποίο αρχικά αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο του Βελιγραδίου, κυρίως για την

πρόγνωσή του καιρού σε περιοχές με απότομης κλίσης όρη, ωστόσο το μοντέλο έχει ήδη λειτουργήσει και ως ένα πλήρως λειτουργικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού στην Ουάσιγκτον των Η.Π.Α. από το κέντρο NCEP. (www.forecast.uoa.gr)

Η εκτέλεση της αυτόματης λειτουργίας του ήταν ο σκοπός της ανάπτυξης του συγκεκριμένου συστήματος. Το περιορισμένης κλίμακας μοντέλο πρόγνωσης καιρού ETA αποτελεί την κύρια συνιστώσα του συστήματος, όπου η εκτέλεση του γίνεται σε περιορισμένη γεωγραφική περιοχή.

Τα δεδομένα εισαγωγής για το μοντέλο προετοιμάζονται από το στάδιο προεπεξεργασίας (pre-processing) του συστήματος και μετά την εφαρμογή του μοντέλου χρησιμοποιεί τα δεδομένα εξόδου με σκοπό τη γραφική απεικόνιση καθώς και για άλλες εφαρμογές μέσω του σταδίου μετεπεξεργασίας (post-processing).

Το ETA μοντέλο είχε αρχικά σχεδιαστεί ως ένα υδροστατικό μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιεί εξισώσεις, στηριζόμενες σε υδροστατική προσέγγιση. Συνεπώς, η καλύτερη δυνατή οριζόντια ανάλυση που μπορούσε να εκτελεστεί, είναι περίπου 10-15 Km. Το μοντέλο ETA επεκτάθηκε με τη βοήθεια του ερευνητικού προγράμματος SKIRON, στο να είναι δυνατή η πρόβλεψη για την παραγωγή και τη διασπορά της ατμοσφαιρικής σκόνης, αλλά και άλλες μορφές ρύπανσης. Στην πραγματικότητα, πρόκειται για την ανάπτυξη ενός αυτοματοποιημένου μοντέλου όπου για την εκτέλεση του μοντέλου ETA παρέχει ένα κατάλληλο περιβάλλον για επεξεργασία δεδομένων και υπολογισμών. Ο στοιχειώδης σκοπός του ερευνητικού προγράμματος ήταν η δημιουργία ενός υπολογιστικά ευέλικτου μοντέλου, το οποίο να παράγει προβλέψεις, κύριος για τοπικές συνθήκες καιρού.

Το σύστημα ΣΚΙΡΩΝ βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του Πανεπιστήμιο Αθηνών και την εποπτεία της λειτουργίας του έχει η Ομάδα Ατμοσφαιρικών Μοντέλων και Πρόγνωσης Καιρού (Atmospheric Modeling And Weather Forecasting Group).

Σε αρχικό στάδιο, το σύστημα SKIRON κάνει δεκτές στην είσοδο μετεωρολογικούς παραμέτρους (γεωδυναμικό, συνιστώσες του αέρα και υγρασία), οι οποίες προέρχονται από πολύ μεγάλης κλίμακας ατμοσφαιρικά μοντέλα. Τέτοια πολύ μεγάλης κλίμακας ατμοσφαιρικά μοντέλα είναι τα μοντέλα ECMWF και NCEP, αλλά και το μοντέλο του πανεπιστημίου της πολιτείας της Florida και το LAPS από την NOAA/FSL. Τα δεδομένα όπου λαμβάνονται έχουν υποστεί την αποκωδικοποίηση και το μετασχηματισμό σε δομή πλαισίου. Οι επιφανειακές παράμετροι, παρατηρούμενες ή προ-καθοριζόμενες (όπως τοπογραφία, επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας, είδος του εδάφους και της βλάστησης, θερμοκρασία

και υγρασία του εδάφους) στη φάση της προετοιμασίας, αποτίθενται πάνω στο πλαίσιο του SKIRON. (www.forecast.uoa.gr)

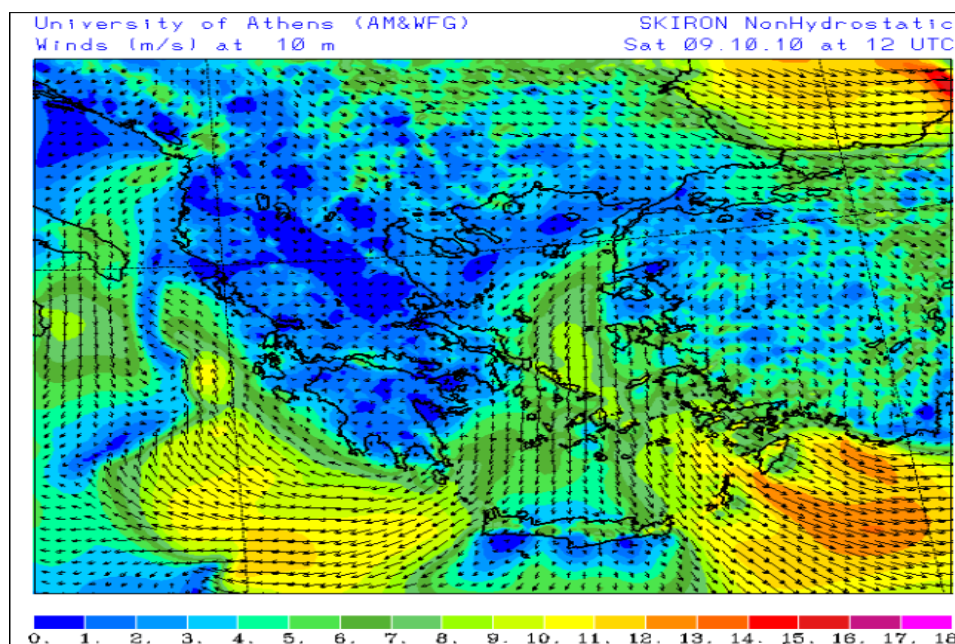
Ειδικότερα, για τη βλάστηση χρησιμοποιούνται 30x30 sec δεδομένα πλαισίου από το μοντέλο ZOBLER, σε αντίθεση με το είδος του εδάφους, όπου εφαρμόζεται το σύνολο δεδομένων UNEP/FAO. Έχουμε την ύπαρξη τριών επιλογών για την επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας:

α) επιχειρησιακά δεδομένα 0,5x0,5° από το κέντρο NCAR και

β) προσαρτημένα δεδομένα σε πλαίσιο από το κέντρο ECMWF.

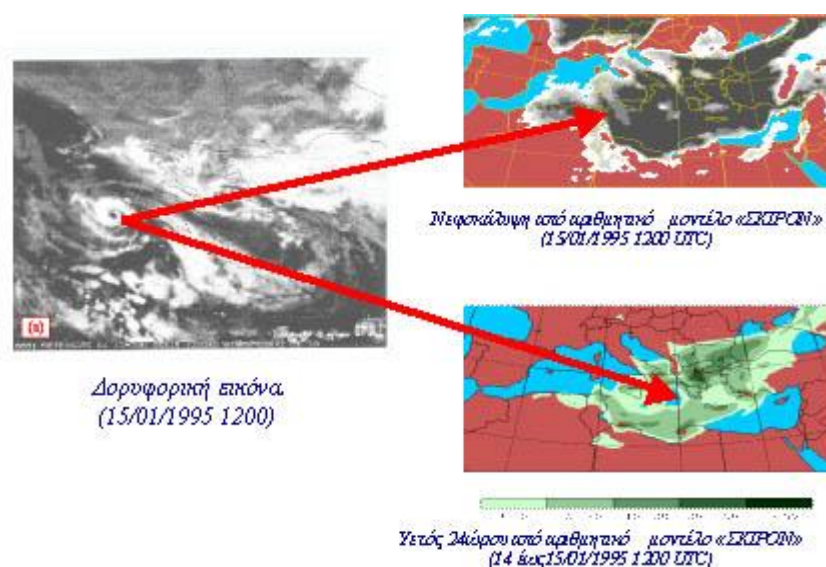
Δύο επίπεδα τα οποία έχουν προκαθορισμένες τιμές ή τα δεδομένα ECMWF προσαρμοσμένα σε πλαίσιο χρησιμοποιούνται για την εδαφική θερμοκρασία και υγρασία. Επίσης, υπολογίζονται και χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας, πάνω σε επικλινές έδαφος, οι κλίσεις και τα αζιμούθια των επικλινών επιφανειών. Και τέλος, υπολογίζονται και οι διαφορές της λευκαύγειας. (www.forecast.uoa.gr)

Πριν χρησιμοποιηθούν τα σύνολα των δεδομένων από το μοντέλο ETA, έχουν υποστεί επεξεργασία από προ-επεξεργαστές. Έπειτα, τα επεξεργασμένα δεδομένα λαμβάνονται από το μοντέλο ETA και τα περνάει ή σ' έναν μονό επεξεργαστή ή σε συνδυασμό επεξεργαστών, όπου λειτουργούν με τη μέθοδο του πολύ-προγραμματισμού. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της επεξεργασίας αυτής καταλαμβάνουν τις επόμενες 3 μέρες και διαμοιράζονται κάθε μέρα στις 12UTC. Η πρόγνωση ατμοσφαιρικής κατάστασης που παρέχει το σύστημα είναι μέχρι και 168 ωρών (7 ημερών) τόσο για τον ευρύτερο χώρο της Ελλάδας όσο και για ολόκληρη την περιοχή της Μεσογείου και της Νότιας Ευρώπης. Ενώ, παράλληλα από την περιοχή της ερήμου Σαχάρας προς τη Μεσόγειο και την Ευρώπη παρέχεται πρόγνωση μεταφοράς και εναπόθεσης σωματιδίων σκόνης μέχρι και 72 ωρών (3 ημερών). Στα σχήματα 3.2 , 3.3 παρουσιάζεται μια πρόβλεψη που παράγεται από το μοντέλο SKIRON στην περιοχή του ελλαδικού χώρου:



Σχήμα 3.2 : Το μοντέλο SKIRON πραγματοποιεί προβλέψει στη νοτιοανατολική Ευρώπη για τα μέτωπα του ανέμου σε ύψος 10 μέτρων.

(Πηγή: www.forecast.uoa.gr)



Σχήμα 3.3 : Παράδειγμα χρήσης αριθμητικών μοντέλου στην περίπτωση ενός κυκλώνα στη περιοχή του νότιου Ιονίου στις 15.01.1995

(Πηγή: www.hnms.gr)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Μέθοδοι αξιολόγησης αριθμητικών μοντέλων

Στα πλαίσια αξιολόγησης των προσομοιώσεων και εκτίμησης της ποιότητας πρόγνωσης για μεγάλες χρονικές περιόδους, δημιουργήθηκε κατάλληλη μεθοδολογία στατιστικής ανάλυσης με την εφαρμογή πλήθους αποδεκτών στατιστικών ελέγχων. Το σύνολο αυτών των στατιστικών ελέγχων καλύπτει μετρήσεις της σχέσης ανάμεσα στα προγνωστικά πεδία και την πραγματική κατάσταση της ατμόσφαιρας. Με αυτή την διαδικασία, ερευνάται η συμπεριφορά της ποιότητας πρόγνωσης ολόκληρης της χρονικής περιόδου των προσομοιώσεων για την εξαγωγή των συμπερασμάτων σχετικά με την ύπαρξη συστηματικών σφαλμάτων, την ακρίβεια και την αξιοπιστία της πρόγνωσης.

Η στατιστική αξιολόγηση παρουσιάζει διαφοροποιήσεις ανάλογα με την εφαρμογή της σε διακριτές ή συνεχείς ατμοσφαιρικές μεταβλητές. Ως διακριτές χαρακτηρίζονται οι μεταβλητές που παίρνουν αποκλειστικά μια τιμή από πεπερασμένο σύνολο τιμών. Ενώ οι συνεχείς μεταβλητές μπορούν να λαμβάνουν οποιαδήποτε τιμή σε ένα ευρύ φάσμα του άξονα των πραγματικών αριθμών. Διακριτές μεταβλητές θεωρούνται η βροχόπτωση, η χιονόπτωση και η νεφοκάλυψη, ενώ η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα, η ταχύτητα του ανέμου και η ατμοσφαιρική πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας κατατάσσονται στις συνεχείς. Σημαντική εμφανίζεται η στατιστική επεξεργασία ατμοσφαιρικών μεταβλητών με μορφή χωρικών πεδίων πλέγματος. Η ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια, τα γεωδυναμικά ύψη και οι θερμοκρασίες καθ' ύψος παρουσιάζονται σαν προγνωστικά πεδία παρεμβλλόμενα στα σημεία πλέγματος ή αντίστοιχα σαν πεδία ανάλυσης, με την εφαρμογή μεθόδων αντικειμενικής ανάλυσης από διεθνή μετεωρολογικά κέντρα. Επίσης, στην επιφάνεια οι προγνώσεις και οι παρατηρήσεις συνεχών ατμοσφαιρικών μεταβλητών προκύπτουν από πεπερασμένο πλήθος διακριτών τιμών.

4.1 Στατιστικά μεγέθη συνεχών μετεωρολογικών μεταβλητών

Η ανάπτυξη μεθοδολογίας στατιστικής ανάλυσης έχει ως στόχο την ανίχνευση τυχόν σφαλμάτων της πρόγνωσης, τα οποία ταξινομούνται σε συστηματικά, σε αριθμητικά και σε τυχαία σφάλματα. Τα συστηματικά σφάλματα μπορεί να προέρχονται από διαφοροποιήσεις του πραγματικού και του προσομοιωμένου ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος, όπως διαφορές στα τοπογραφικά χαρακτηριστικά και το είδος κάλυψης του εδάφους. Κατά την διάρκεια της εφαρμογής μεθόδων πεπερασμένων διαφορών καθώς και από σφάλματα αποκοπής αναπτύσσονται τα αριθμητικά σφάλματα. Ωστόσο, μπορεί να φέρουν εσφαλμένα αριθμητικά αποτελέσματα προβλήματα στον προγραμματισμό του κώδικα των αριθμητικών μοντέλων. Επίσης, κυρίως κατά τις ενέργειες φυσικών παραμετροποιήσεων προέρχονται τα τυχαία σφάλματα όπως η προσομοίωση των τυρβωδών χαρακτηριστικών του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Σημαντικά στην ανάπτυξη τυχαίων σφαλμάτων συνεισφέρει η στοχαστική φύση των συντελούμενων διεργασιών του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Επίσης, έχει θεμελιωθεί μεγάλο πλήθος στατιστικών μεγεθών στα πλαίσια της διαδικασίας αξιολόγησης συνεχών μετεωρολογικών μεταβλητών. Στη συνέχεια αναφέρονται τα μεγέθη που συμπεριλαμβάνονται στη στατιστική ανάλυση του συνόλου των προσομοιώσεων, θεωρώντας F την τιμή της πρόγνωσης και O την αντίστοιχη μετρούμενη τιμή συγκεκριμένης συνεχούς μετεωρολογικής μεταβλητής (Κατσαφάδος, 2003).

➤ Συστηματικό σφάλμα (Bias)

Το συστηματικό σφάλμα (Wilks, 1995) κάνει εκτίμηση για την αντιστοιχία ανάμεσα στη μέση τιμή της πρόγνωσης και της παρατήρησης. Το συγκεκριμένο μέγεθος υπολογίζει το άθροισμα διαφορών σε σύνολο N τιμών :

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i) = \bar{F} - \bar{O}$$

F : τιμή της πρόγνωσης

O: την αντίστοιχη μετρούμενη τιμή συγκεκριμένης συνεχούς μετεωρολογικής μεταβλητής.

Σε περίπτωση που $Bias < 0$, το μοντέλο υποεκτιμά το σύνολο τιμών της συγκεκριμένης μεταβλητής, ενώ η τιμή $Bias > 0$ σχετίζεται με υπερεκτίμηση της αντίστοιχης τιμής παρατήρησης από το μοντέλο.

➤ **Τετραγωνική ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root mean square Error-RMSE)**

Αυτό το μέγεθος θεωρείται από τα πλέον εξαπλωμένα για την εκτίμησης ακρίβειας της πρόγνωσης και λειτουργεί σε πεδία πλέγματος καθ' ύψος καθώς και στο σύνολο συνεχών μεταβλητών των παρατηρήσεων επιφανείας :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Fi - Oi)^2}$$

Η παραπάνω σχέση παίρνει τιμές στο διάστημα $[0, +\infty]$ και τέλεια προγνωστικά πεδία προσεγγίζουν την τιμή 0. Το μέγεθος RMSE κρατάει τις μονάδες των υπό σύγκριση μετεωρολογικών μεταβλητών. (Wilks, 1995)

➤ **Συντελεστής συσχέτισης (correlation coefficient-r)**

Ο συντελεστής συσχέτισης (Wilks, 1995) αποτελεί ενδεικτικό στοιχείο της σχέσης ανάμεσα στις τιμές δυο μεταβλητών και ορίζεται ως η αναλογία της συμμεταβολής των τιμών δυο πληθυσμών ($cov(F, O)$) προς το γινόμενο των τυπικών τους αποκλίσεων (S_F, S_O).

$$r_{F,O} = \frac{cov(F, O)}{S_F * S_O}$$

Ο συντελεστής συσχέτισης παίρνει τιμές στο διάστημα $[-1,+1]$. Σε περίπτωση που $r_{F,O} = -1$, θεωρείται αντίθετη διακύμανση στις τιμές δυο πληθυσμών, οι οποίες σε καρτεσιανό διάγραμμα τοποθετούνται κατά μήκος ευθείας γραμμής με αρνητική κλίση. Αντίθετα, σε $r_{F,O} = +1$ οι τιμές των δυο πληθυσμών παρουσιάζουν ταυτόσημη διακύμανση και ακολουθούν ευθεία γραμμή σε με θετική κλίση. Η τιμή 0 δείχνει την μη συσχέτιση των τιμών των δυο πληθυσμών.

➤ Επίδοση πρόγνωσης (Forecast skill-SS)

Στην εκτίμηση της ακρίβειας των προγνωστικών πεδίων σε σχέση με τις αντίστοιχες ποσότητες αναφοράς αναφέρεται η γενική μορφή αυτού του μεγέθους. Τυπικές επιλογές των ποσοτήτων αναφοράς είναι οι βέλτιστες και χειρίστες τιμές στατιστικών μεγεθών, όπως αυτές προκύπτουν κατά την ανάλυση των προγνωστικών πεδίων. Η επίδοση της πρόγνωσης μπορεί να προσδιοριστεί με βάση το στατιστικό μέγεθος RMSE και πήρε μέρος σε προγνωστικά πεδία πλέγματος με τη μορφή:

$$SS_{RMSE} = \frac{RMSE - RMSE_{wors}}{RMSE_{perf} - RMSE_{wors}} * 100$$

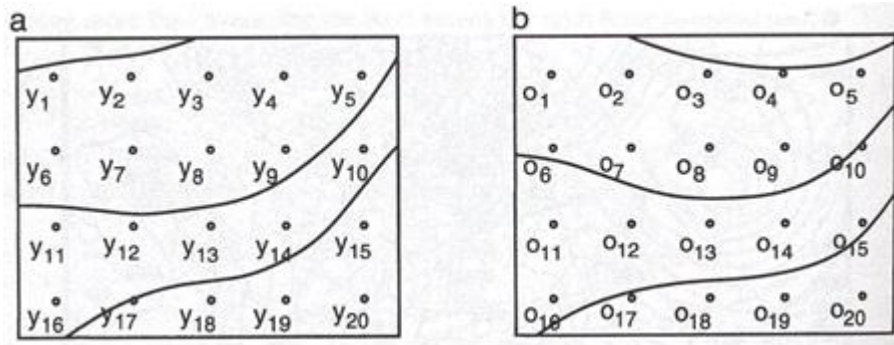
Όπου $RMSE_{perf}$ είναι η ελάχιστη και $RMSE_{wors}$ είναι η μέγιστη τιμή του στατιστικού μεγέθους όπως αυτά παρουσιάζονται κατά την αξιολόγηση των προγνωστικών πεδίων. Αν ισχύει $RMSE = RMSE_{perf} \Rightarrow SSR_{RMSE}=100$ τότε η πρόγνωση παρουσιάζει τέλεια επίδοση. Εάν $RMSE = RMSE_{wors} \Rightarrow SSR_{RMSE} = 0$ η πρόγνωση παίρνει τη χειρίστη τιμή, ενώ το όριο 60 θεωρείται ως τιμή αναφοράς, κατά την οποία προγνώσεις που υπολείπονται αυτής θεωρούνται ανεπαρκείς σχετικά με την προγνωστική τους ικανότητα. Σε αυτό το στατιστικό έλεγχο, η χρήση του συντελεστή SS_{RMSE} περιορίζεται σε ποιοτικές αναλύσεις χρονικής μεταβολής της επίδοσης των προγνώσεων, λόγω της έλλειψης ανεξαρτησίας που παρουσιάζει. (Wilks, 1995)

➤ **Συντελεστής S1 (S1 Coefficient)**

Ο συντελεστής S1 (Wilks, 1995) συνιστά ένα μέγεθος το οποίο συντελεί στην εκτίμηση της πρόγνωσης των μετεωρολογικών μεταβλητών, όπως είναι βαθμίδες ατμοσφαιρικής πίεσης, γεωδυναμικού ύψους, θερμοκρασίας αέρα και έντασης ανέμου καθ' ύψος. Το παραπάνω μέγεθος λειτουργεί κυρίως σε πεδία πλέγματος, καθώς εκμεταλλεύεται τις διαφορές ανάμεσα σε γειτονικά σημεία. Οι διαφορές αυτές υπολογίζονται για κάθε ζεύγος γειτονικών σημείων πλέγματος του προγνωστικού πεδίου καθώς και του πεδίου ανάλυσης. Ορίζοντας ως Δy τη διαφορά δύο γειτονικών σημείων του προγνωστικού πεδίου και ως ΔO την αντίστοιχη διαφορά του πεδίου ανάλυσης, με βάση το Σχήμα (4.1), οι συγκεκριμένοι όροι μπορούν να λάβουν πιθανές τιμές $\Delta y = y_3 - y_2$ και $\Delta O = O_3 - O_2$. Σε περίπτωση όπου το εκτιμώμενο πεδίο αναπαράγει ταυτόσημα την τάση και το μέγεθος των βαθμίδων σε σχέση με το πεδίο ανάλυσης, θα ισχύει ότι $\Delta y(i, j) = \Delta O(i, j)$. Ο συντελεστής S1 προκύπτει από το άθροισμα των διαφορών ζευγών ($\Delta y, \Delta O$) σύμφωνα με τη σχέση (Wilks, 1995):

$$S1 = \frac{\sum_{i=1}^{JM} \sum_{j=1}^{IM} |\Delta y(i, j) - \Delta O(i, j)|}{\sum_{i=1}^{JM} \sum_{j=1}^{IM} \text{MAX} \{|\Delta y(i, j), \Delta O(i, j)|\}} * 100$$

Οι παραπάνω όροι των αθροισμάτων IM και JM δείχνουν το σύνολο των σημείων πλέγματος της διεύθυνσης δύσης-ανατολής και νότου-βορρά, αντίστοιχα και η μεταβολή τους είναι ανάλογη με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλέγματος κάθε προσομοίωσης. Επίσης τα προγνωστικά πεδία τα οποία είναι ταυτόσημα με πεδία ανάλυσης επιδεικνύουν $S1=0$, ενώ οι φτωχότερες προγνώσεις αποτελούνται από σημαντικά υψηλότερες τιμές του συντελεστή.



Σχήμα 4.1 Υποθετικά ατμοσφαιρικά πεδία πρόγνωσης (α) και ανάλυσης (β) όπως παριστάνονται με καμπύλες γραμμές σε ορθογώνιο δειγματικό χώρο. Η αντικειμενική αποτίμηση της πρόγνωσης απαιτεί την παραπάνω μορφή των πεδίων σε σημεία πλέγματος (στοιχειώδεις κύκλοι), τα οποία αντιστοιχούν σε ταυτόσημες γεωγραφικές περιοχές. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το πλέγμα εμφανίζει 4 γραμμές κατά τη διεύθυνση βορρά-νότου και 5 στήλες κατά τη διεύθυνση ανατολής-δύσης (Wilks, 1995).

➤ Συσχέτιση κλιματολογικών ανωμαλιών (Anomaly Correlation-AC)

Η συσχέτιση κλιματολογικών ανωμαλιών είναι ένα ευρείας διαδεδομένο στατιστικό μέγεθος εκτίμησης της σχέσης ανάμεσα σε πεδία πλέγματος. Ωστόσο ο υπολογισμός του συγκεκριμένου μεγέθους βασίζεται στη μετατροπή των τιμών προγνωστικών και μετρούμενων μετεωρολογικών μεταβλητών σε κλιματολογικές ανωμαλίες, οι οποίες προκύπτουν με αφαίρεση της αντίστοιχης μέσης κλιματολογικής τιμής από τα προγνωστικά πεδία και τα πεδία ανάλυσης. Ανάλογα με τον συντελεστή S1, το AC σε πεδίο πλέγματος διαστάσεων IM, JM εκτιμάται σύμφωνα με τη σχέση (Wilks, 1995):

$$AC = \frac{\sum_{j=1}^{JM} \sum_{i=1}^{IM} [(y_{(i,j)} - c_{(i,j)}) (o_{(i,j)} - c_{(i,j)})]}{\sum_{j=1}^{JM} \sum_{i=1}^{IM} (y_{(i,j)} - c_{(i,j)})^2 \sum_{j=1}^{JM} \sum_{i=1}^{IM} (o_{(i,j)} - c_{(i,j)})^2}$$

Όπου $y_{(i,j)}$ αντιστοιχεί στην προγνωστική τιμή του σημείου πλέγματος (i, j) , $o_{(i,j)}$ στην αντίστοιχη τιμή του πεδίου ανάλυσης και $c_{(i,j)}$

αντιπροσωπεύει την αντίστοιχη κλιματολογική τιμή της συγκεκριμένης μετεωρολογικής μεταβλητής. Επίσης η συσχέτιση κλιματολογικών ανωμαλιών αποτυπώνει τις αποκλίσεις (ανωμαλίες) των προγνωστικών πεδίων και των πεδίων ανάλυσης από το μέσο κλιματολογικό πεδίο. Αν το προγνωστικό πεδίο και το πεδίο ανάλυσης υπερβαίνουν ή υπολείπονται των αντίστοιχων κλιματολογικών τιμών, ο αριθμητής του κλάσματος της παραπάνω σχέσης παίρνει θετικές τιμές. Η τιμή $AC=0.6$ είναι χαρακτηριστικό κάτω όριο για τον καθορισμό προγνωστικών πεδίων ως συνοπτικά αξιοποιήσιμων.

➤ **Συχνότητα προγνωστικών σφαλμάτων (Frequency of forecast errors)**

Το μέγεθος της συχνότητας προγνωστικών σφαλμάτων (Wilks, 1995) έχει εφαρμογή στα πλαίσια της στατιστικής ανάλυσης για να επιτευχθεί η αξιολόγηση των ελαχίστων και μεγίστων προγνωστικών τιμών της θερμοκρασίας. Αρχικά, υπολογίζονται οι διαφορές των εκτιμώμενων από τις αντίστοιχες μετρούμενες τιμές και στη συνέχεια ταξινομούνται σε κλάσεις (π.χ. των $2^{\circ}K$). Τα σφάλματα των ελάχιστων ή μεγίστων εκτιμώμενων θερμοκρασιών υπολογίζονται σε χρονικές υποπεριόδους κάθε προσομοίωσης και μετά ομαδοποιούνται στις αντίστοιχες κλάσεις. Η ιδεατή συχνότητα σφαλμάτων ακολουθεί τη μορφή κανονικής (Gauss) κατανομής με μέγιστη τιμή η οποία είναι κοντά στην κλάση μηδέν.

4.2 Στατιστικά μεγέθη διακριτών μετεωρολογικών μεταβλητών

Η συγκεκριμένη στατιστική ανάλυση αναφέρεται σε ρητές προγνώσεις διακριτών μετεωρολογικών μεταβλητών. Ο όρος ρητή απευθύνεται σε πρόγνωση που περιγράφεται αυστηρά μονοσήμαντα μέσα από πεπερασμένο σύνολο ενδεχομένων. Οι ρητές αυτές προγνώσεις δεν περιλαμβάνουν εκφράσεις αβεβαιότητας, όπως συμβαίνει σε στοχαστικές προγνώσεις. Η αξιολόγηση μετεωρολογικών μεταβλητών, όπως η βροχόπτωση, βασίζεται στη δημιουργία πίνακα ενδεχομένων, διαστάσεων 2x2, που περιλαμβάνει το σύνολο των πιθανών συνδυασμών πρόγνωσης και παρατήρησης (πίνακας 4.2). Το κάθε στοιχείο του πίνακα αντιπροσωπεύει το πλήθος των περιπτώσεων, όπου η εκτιμώμενη και η παρατηρούμενη βροχόπτωση υπερβαίνει προκαθορισμένο ύψος σε αντίστοιχες χρονικές περιόδους (Wilks, 1995).

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ | | | |
|------------|-----|-----|-----|
| | OXI | NAI | |
| a+b | b | a | NAI |
| d+c | d | c | OXI |
| N=a+b+c+d | b+d | a+c | |

Πίνακας 4.2 : Πίνακας ενδεχομένων διακριτών μετεωρολογικών μεταβλητών. Τα γράμματα a-d αντιστοιχούν στο σύνολο των πιθανών ζευγών πρόγνωσης/παρατήρησης (σύνθεση από Wilks, 1995).

Ο όρος a δηλώνει το πλήθος των περιπτώσεων όπου οι εκτιμώμενες και παρατηρούμενες τιμές υπερβαίνουν προκαθορισμένο ύψος βροχόπτωσης και θεωρείται ως επιτυχής πρόγνωση. Αντίστοιχα, επιτυχείς θεωρούνται οι περιπτώσεις μη υπέρβασης του προκαθορισμένου ύψους βροχόπτωσης τόσο από

την προγνωστική τιμή όσο και από την τιμή της παρατήρησης, το πλήθος των οποίων αντιστοιχεί στον όρο d. Το στοιχείο b αντιπροσωπεύει το πλήθος των ενδεχομένων όπου η εκτιμώμενη τιμή υπερβαίνει συγκεκριμένο ύψος βροχόπτωσης, ενώ η αντίστοιχη τιμή παρατήρησης όχι. Και τέλος το στοιχείο c δηλώνει τη συχνότητα όπου εμφανίζονται οι περιπτώσεις κατά τις οποίες η μετρούμενη τιμή υπερβαίνει προκαθορισμένο ύψος βροχόπτωσης σε αντίθεση με την εκτιμώμενη τιμή. Το ενδεχόμενο b χαρακτηρίζεται ως εσφαλμένη πρόγνωση (False alarm), ενώ το ενδεχόμενο c ως αποτυχής πρόγνωση (missing case). Το σύνολο των πιθανών συνδυασμών είναι $n=a+b+c+d$ με τις ιδεατές προγνώσεις να επιδεικνύουν $b=c=0$. Ο παραπάνω πίνακας ενδεχομένων αποτελεί τη βάση για θεμελίωση βαθμωτών στατιστικών μεγεθών στο πλαίσιο αξιολόγησης διακριτών μετεωρολογικών μεταβλητών.

➤ **Ισοδύναμος βαθμός προειδοποίησης (Equitable threat score-ETS)**

Το συγκεκριμένο μέγεθος αποτελεί δείκτη της ικανότητας εκτίμησης προκαθορισμένου ύψους βροχής και με βάση τα στοιχεία του πίνακα ενδεχομένων περιγράφεται από τη σχέση:

$$ETS = \frac{a - a_r}{a + b + c - a_r}$$

Όπου $a_r = \frac{(a+b)(a+c)}{a+b+c+d}$ εκφράζει την τυχαία συχνότητα επιτυχών εκτιμήσεων που υπερβαίνουν προκαθορισμένο ύψος βροχής. Ο ισοδύναμος βαθμός προειδοποίησης παίρνει τιμές στο διάστημα $[-1, +1]$ με απόλυτα επιτυχείς προγνώσεις όπου παρουσιάζουν τιμή +1. Σταθερές ή τυχαίες προγνώσεις παρουσιάζουν βαθμό προειδοποίησης κοντά στο 0 (μηδέν). (Wilks, 1995)

➤ **Βαθμός σφάλματος προειδοποίησης (False alarm rate-FAR)**

Το συγκεκριμένο αποτελεί το μέγεθος των προγνώσεων οι οποίες δεν επαληθεύονται. Περιλαμβάνει το σύνολο των περιπτώσεων που οι εκτιμώμενες τιμές υπερβαίνουν προκαθορισμένο όριο βροχής και συνδυάζονται με το ενδεχόμενο μη επαλήθευσης από τις αντίστοιχες τιμές παρατήρησης (Wilks, 1995):

$$FAR = \frac{b}{a + b}$$

Ο βαθμός σφάλματος προειδοποίησης κυμαίνεται στο διάστημα [0,+1] με τις μικρότερες τιμές να καταδεικνύουν καλύτερη επίδοση.

➤ **Πιθανότητα ανίχνευσης (Probability of detection-POD)**

Το συγκεκριμένο μέγεθος εκτιμά, από το σύνολο των περιπτώσεων που η παρατηρούμενη τιμή υπερβαίνει το προκαθορισμένο ύψος βροχόπτωσης, την αναλογία των επιτυχών προγνώσεων και δίνεται από τη σχέση:

$$POD = \frac{a}{a + c}$$

Το παραπάνω μέγεθος λαμβάνει τιμές στο διάστημα [0,+1] με βέλτιστες τιμές να κυμαίνονται κοντά στο 1. (Wilks, 1995)

➤ **Συστηματικό σφάλμα (bias-b)**

Το συστηματικό σφάλμα (Wilks, 1995) είναι μέγεθος, το οποίο αποτελεί την αναλογία της συχνότητας θετικών εκτιμήσεων (περιπτώσεις προγνώσεων “ΝΑΙ” του πίνακα ενδεχομένων) προς τη συχνότητα θετικών παρατηρήσεων (περιπτώσεις παρατηρήσεων “ΝΑΙ” του πίνακα ενδεχομένων) και περιγράφεται ως:

$$B = \frac{a + b}{a + c}$$

Στην περίπτωση όπου έχουμε προγνώσεις με B=1, αυτές δηλώνουν ότι η συγκεκριμένη περίπτωση υπέρβασης προκαθορισμένου ύψους βροχής εκτιμήθηκε με την ίδια συχνότητα με την οποία παρατηρήθηκε. Τιμές σφάλματος μεγαλύτερες της μονάδας αντιστοιχούν σε περιπτώσεις οι

οποίες εκτιμήθηκαν συχνότερα από ότι παρατηρήθηκαν και ταυτίζονται με την υπερεκτίμηση της πρόγνωσης.

➤ **Τετραγωνική ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος για διακριτές μετεωρολογικές μεταβλητές (Root mean square error-rmse)**

Το συγκεκριμένο στατιστικό μέγεθος ποσοτικοποιεί το εύρος των διαφορών ανάμεσα στις εκτιμώμενες τιμές και στις παρατηρήσεις που υπερβαίνουν προκαθορισμένο ύψος βροχής. Η εξίσωση που εκφράζει το rmse παίρνει τη μορφή:

$$rmse = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2}$$

όπου F_i και O_i τα αντίστοιχα εκτιμώμενα και μετρούμενα ύψη βροχής σε σύνολο N παρατηρήσεων που υπερβαίνουν το προκαθορισμένο όριο. Η συμπεριφορά της τετραγωνικής ρίζας μέσου τετραγωνικού σφάλματος για διακριτές μετεωρολογικές μεταβλητές παρουσιάζεται ταυτόσημη με την αντίστοιχη για συνεχείς μεταβλητές.

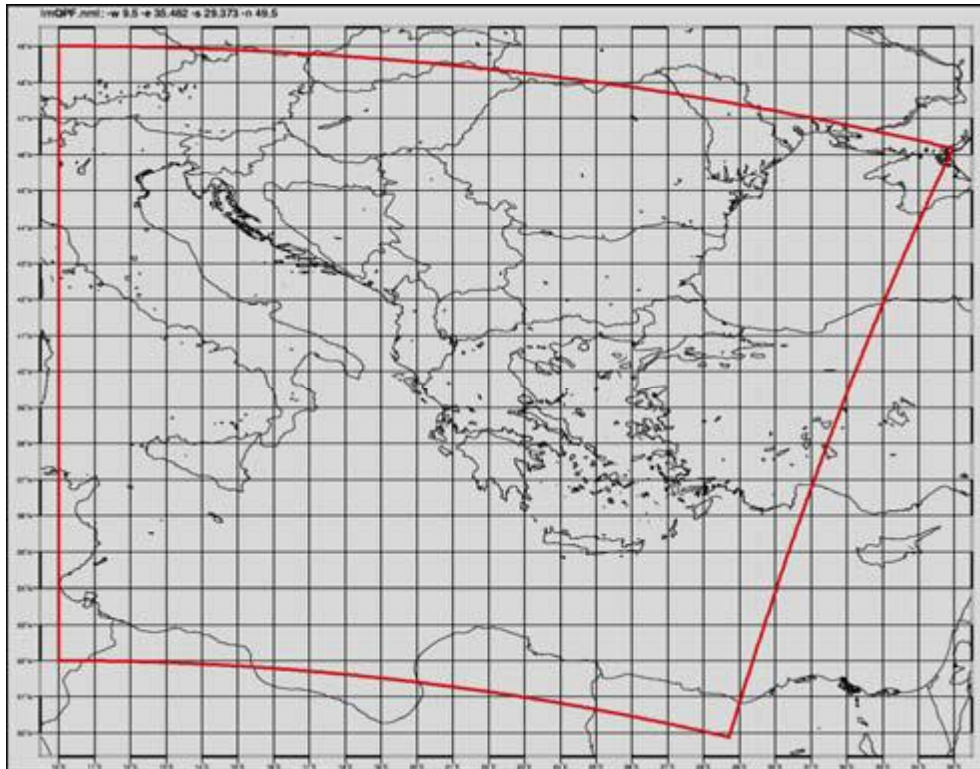
Η στατιστική ανάλυση που μπορεί να εφαρμοστεί στο σύνολο των προσομοιώσεων περιλαμβάνει τα παραπάνω στατιστικά μεγέθη που αναφέρθηκαν για συνεχείς και διακριτές μετεωρολογικές μεταβλητές. Κατά τη διάρκεια της προγνωστικής διαδικασίας τίθεται η ανάδειξη σημαντικών πληροφοριών ως βασικός προσανατολισμός κατά το σχεδιασμό και ανάπτυξη της ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας, η ποιότητα των αρχικών και οριακών συνθηκών σε συνδυασμό με τη συμπεριφορά των αριθμητικών μοντέλων αποτελούν αντικείμενα μελέτης στα πλαίσια διερεύνησης της προγνωστικής ικανότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Μελέτες αξιολόγησης αριθμητικών μοντέλων πρόγνωσης καιρού

5.1 Αξιολόγηση του μοντέλου COSMO.GR σε περίπτωση έντονων βροχοπτώσεων

Σύμφωνα με τη μελέτη των Αυγουστόγλου κ.α. (2008) η οποία είχε ως σκοπό την ποσοτική εκτίμηση υετού του τοπικού μοντέλου αριθμητικής πρόγνωσης COSMO.GR (σχήμα 5.1) όπου, η βελτίωση της αποτελεί μία από τις σημαντικότερες επιδιώξεις των τοπικών μοντέλων αριθμητικής πρόγνωσης καιρού. Ιδιαίτερα κάτω από το πρίσμα των ολοένα αυξανόμενων επιχειρησιακών απαιτήσεων για εξειδικευμένα μετεωρολογικά προγνωστικά προϊόντα. Όμως, περιορίζονται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των αποτελεσμάτων από αιτίες όπως είναι οι ελλειπείς αρχικές συνθήκες αλλά και οι προσεγγίσεις τόσο στα αριθμητικά σχήματα ολοκλήρωσης όσο και στις φυσικές διαδικασίες (Beard and Ochs, 1993). Επίσης, σχετικά μικρά σφάλματα στις αρχικές συνθήκες μπορούν να οδηγήσουν σε καταστάσεις χαμηλής προγνωσιμότητας με μεγάλα σφάλματα στον υετό (Zhang et al., 2000, Hohenegger et al., 2006). Έτσι οι παραπάνω διαπιστώσεις οδήγησαν τις μετεωρολογικές υπηρεσίες που αποτελούν τη διακρατική ομάδα “COSMO” (Consortium of Small Scale Modeling) σε μία συντονισμένη προσπάθεια διερεύνησης της ποσοτικής εκτίμησης του υετού με βάση το συνώνυμο κοινό προγνωστικό μοντέλο “COSMO” (πρώην LM).

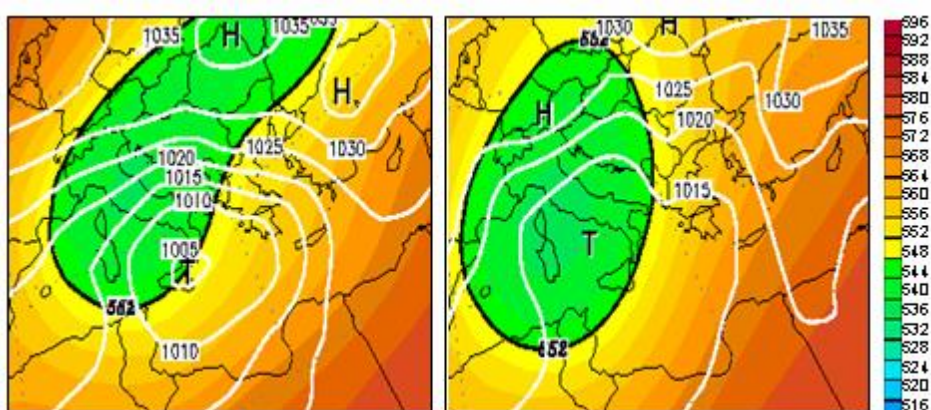


ΣΧΗΜΑ 5.1. Περιοχή ολοκλήρωσης του μοντέλου “COSMO.GR” Πηγή : Αυγουστόγλου κ.α, (2008)

Μεθοδολογία

Ουσιαστικά, σε αυτή την έρευνα, με αρχικές συνθήκες από το παγκόσμιο μοντέλο (GME) της Γερμανικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας στις 00 UTC για περιοχή με οριζόντια ανάλυση πλέγματος 0.0625 (~7 km) 273×273 σημείων, 40 κατακόρυφα επίπεδα και χρονικό βήμα ολοκλήρωσης 40 δευτερολέπτων (Σχήμα 5.1) πραγματοποιήθηκαν οι εκτελέσεις του μοντέλου με βάση την έκδοση COSMO.3.19. Η έρευνα έδωσε ιδιαίτερη έμφαση στον 24ωρο υετό από την 6η μέχρι την 30η προγνωστική ώρα μεταξύ 23ης και 24^{ης} Νοεμβρίου 2005. Η περίοδος αυτή θεωρήθηκε ως η καταλληλότερη με σκοπό οι αρχικές συνθήκες να είναι όσο το δυνατόν ρεαλιστικότερες με εξαίρεση τις αρχικές προγνωστικές ώρες που γενικά χαρακτηρίζονται από χαμηλή αξιοπιστία λόγω προβλημάτων τύπου “spin-up”. Αποκομμένο χαμηλό στα 500 hPa πάνω από την Ιταλία και τα Β. Βαλκάνια κινείται αντίθετα προς τη Δ. Μεσόγειο και κατά την 24/11/2005 κινείται Α/ΒΑ. Η Δ/ΝΔ ροή πάνω από την Ελλάδα σταδιακά εξελίσσεται σε Ν/ΝΔ, σε επίπεδο συνοπτικής κατάστασης (Σχήμα 5.2). Στην επιφάνεια, ένα ψυχρό σύστημα υψηλών πιέσεων

πάνω από τα ΒΑ Βαλκάνια συνδυάζεται με χαμηλό πάνω από την κεντρική Μεσόγειο το οποίο συνοδεύεται με μετωπική δραστηριότητα που κινείται ανατολικά καλύπτοντας την Ελλάδα. Ωστόσο, εκδηλώθηκαν βροχές και καταιγίδες πάνω από όλη τη χώρα με πλημμύρες στην ευρύτερη περιοχή των Αθηνών το ΒΑ Αιγαίο και την Πελοπόννησο. Διαπιστώθηκε υπερεκτίμηση του υετού σε περιοχές της Β. Ελλάδας και υποεκτίμηση σε άλλες, από το επιχειρησιακό τρέξιμο του μοντέλου. Επίσης, το ίδιο παρατηρήθηκε και για την ευρύτερη περιοχή των Αθηνών. Ακόμη διαπιστώθηκε υπερεκτίμηση του υετού στο Α Αιγαίο και υποεκτίμηση στη ΝΑ χώρα.



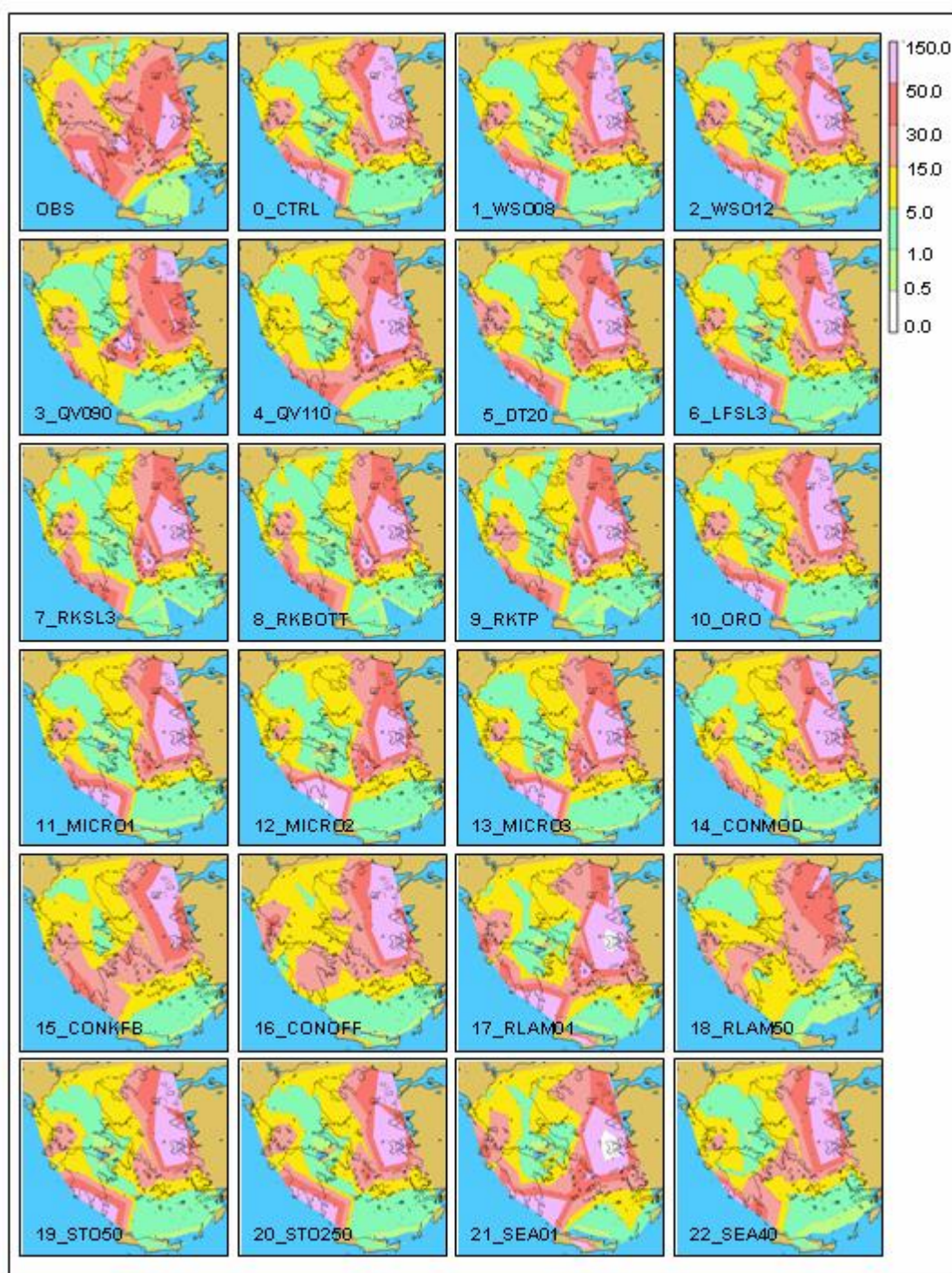
ΣΧΗΜΑ 5.2. Χάρτες ανάλυσης 500 hPa (gpm, με χρωματική κλίμακα) και επιφάνειας (hPa, με ισοπληθείς) στις 23/11/2005 00 UTC (αριστερά) και 24/11/2005 00 UTC (δεξιά) (c) NCEP/WETTERZENTRALE
Πηγή: Αυγουστόγλου κ.α. (2008)

Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής, παρουσιάζονται με συντομία σε αναφορά με τον μέσο αθροιστικό υετό 24ώρου των παρατηρήσεων (23/11/2005 06 UTC έως 24/11/2005 06 UTC) σε σχέση με τον αντίστοιχο αθροιστικό προγνωστικό (00+06UTC-00+30UTC). Όπου υπολογίζεται στη γεωγραφική θέση των 60 μετεωρολογικών σταθμών της Ελληνικής Επικράτειας, συνοπτικών και αυτόματων που λήφθηκαν υπ' όψη στο πλησιέστερο σημείο πλέγματος. Ο συνολικός προγνωστικός υετός αποδίδεται σαν άθροισμα του στρατόμορφου (STRATF) και εκείνου από κατακόρυφη μεταφορά (CONV). Σε ξεχωριστά υετογράμματα που σχεδιάστηκαν με βάση τις αντίστοιχες τιμές στις θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών (Σχήμα 5.3) παρουσιάζεται η διασπορά του παρατηρούμενου και προγνωστικού 24ωρου υετού στην Ελληνική Επικράτεια. Ωστόσο, παρατηρούμε ότι αν και η γενική κατανομή του υετού είναι παρεμφερής με εκείνη των παρατηρήσεων, η θέση των μεγίστων υετού εμφανίζει αρκετή απόκλιση τόσο

μεταξύ των πειραμάτων όσο και με τα υετογράμματα της επιχειρησιακής εκτέλεσης του μοντέλου.

Η παρούσα έρευνα παρουσιάζει τμήμα του πρώτου μέρους μίας κοινής εκτεταμένης προσπάθειας του “COSMO” για τη δημιουργία ερευνητικής βάσης για τη συστηματική αντιμετώπιση του πολύ σημαντικού προβλήματος της ποσοτικής εκτίμησης του υετού. Τα αποτελέσματα δίνουν μια πληρέστερη αντίληψη των δυνατοτήτων του μοντέλου. Επίσης προσφέρουν τη δυνατότητα στην ΕΜΥ να εισάγει τεχνογνωσία που αποβαίνει πολύτιμη στην αξιολόγηση των επιχειρησιακών της προϊόντων που προέρχονται από τα περιοχικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού.



ΣΧΗΜΑ 5.3. Υετογράμματα παρατηρούμενου (OBS) και προγνωστικού αθροιστικού υετού 24ωρου(mm) για την περίοδο 23.11.2005, 06 UTC – 24.11.2005, 06 UTC.
Πηγή: Αυγουστόγλου κ.α, (2008)

5.2 Αξιολόγηση του μοντέλου WRF - ARW σε περίπτωση έντονων βροχοπτώσεων στην Χαλκιδική

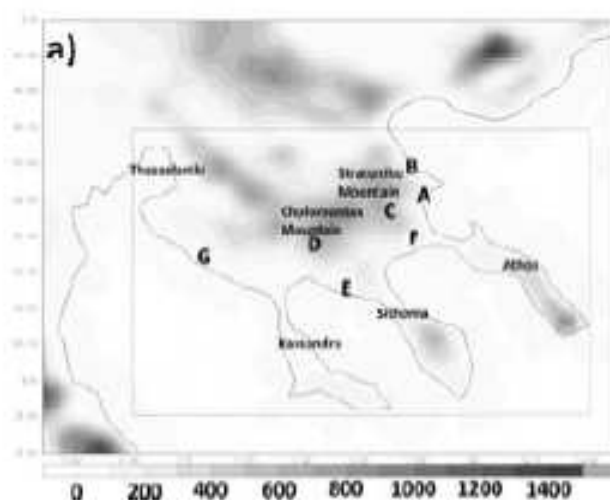
Η συγκεκριμένη μελέτη των Ευσταθίου κ.α, (2012) βασίζεται σε μια ατμοσφαιρική διαταραχή που έπληξε την Ελλάδα στις 8 - 12 Οκτ 2006 με παρατεταμένες έντονες βροχοπτώσεις στη Βόρεια και Κεντρική Ελλάδα και έντονες καταιγίδες πάνω από το νησί της Κρήτης. Έντονες βροχοπτώσεις σημειώθηκαν σε όλη τη Βόρειο Ελλάδα και ειδικά ένα ρεκόρ 24h συνολικής βροχόπτωσης όπου παρατηρήθηκε στη χερσόνησο της Χαλκιδικής στις 8 Οκτωβρίου 2006. Ένας μετεωρολογικός σταθμός που βρίσκεται στην ανατολική πλευρά της Χαλκιδικής (σταθμός Σκουριές στο 40.47ο N , 23.71ο E) κατέγραψε 268 χιλιοστά υετού σε 24 ώρες με μέγιστη ένταση βροχής 140 mm ανά 3h. Αυτή η έντονη βροχόπτωση συνδέθηκε με ισχυρή σύγκλιση στα χαμηλά επίπεδα που επιβάλλεται από τη χαμηλή πίεση ενός συστήματος που αναπτύχθηκε πάνω από το Αιγαίο και με τοπογραφική ανύψωση και με ισχυρή σύγκλιση της υγρασίας στα χαμηλά επίπεδα πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος. Η προσομοίωση του επεισοδίου έγινε με τη χρήση του αριθμητικού μοντέλου Πρόβλεψης καιρού (WRF). Τα αποτελέσματα του μοντέλου υψηλής ανάλυσης συγκρίθηκαν με τις διαθέσιμες μετρήσεις των βροχόμετρων, προκειμένου να διερευνηθεί η ικανότητα των τριών μικροφυσικών παραμετροποιήσεων για να αναπαράγουν την έντονη βροχόπτωση κατά τη διάρκεια της εξαιρετικά πολύπλοκης τοπογραφίας της χερσονήσου της Χαλκιδικής. Τα αποτελέσματα αυτών των ελέγχων δείχνουν ότι το WRF που διαμορφώθηκε χρησιμοποιώντας την ETA Ferrier μικροφυσική παρέχει καλύτερα στατιστικά αποτελέσματα για τη έντονη βροχόπτωση ενώ ήταν σε θέση να παράγει εκ νέου τη χωρική κατανομή της εκδήλωσης της βροχόπτωσης αυτής.

Μεθοδολογία

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις πραγματοποιούνται με τη χρήση του Advanced Research (WRF) μοντέλου Version 3.2 . Το μοντέλο WRF είναι ένα πλήρως συμπιεστό μη υδροστατικό, μοντέλο και με πολλαπλές δυνατότητες (Skamarock et al . 2008) . Έχουν οριστεί για το έργο αυτό τρία ένθετα πλέγματα : Το πλέγμα 1 καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος των ακτών της Ευρώπης , της Μεσογείου και της Βόρειας Αφρικής με μια απόσταση του πλέγματος των 27 χιλιομέτρων . Το πλέγμα 2 έχει απόσταση 9Km που καλύπτει ένα μεγάλο μέρος της ανατολικής Μεσογείου και το πλέγμα 3 καλύπτει τη βόρεια και την κεντρική Ελλάδα και ένα μεγάλο μέρος των Βαλκανίων με χωρική ανάλυση 3 χιλιομέτρων. Κατά την κατακόρυφη διάσταση , 28 άνισα διαστήματα επίπεδα σίγμα είχαν επιλεγεί. Οι προσομοιώσεις

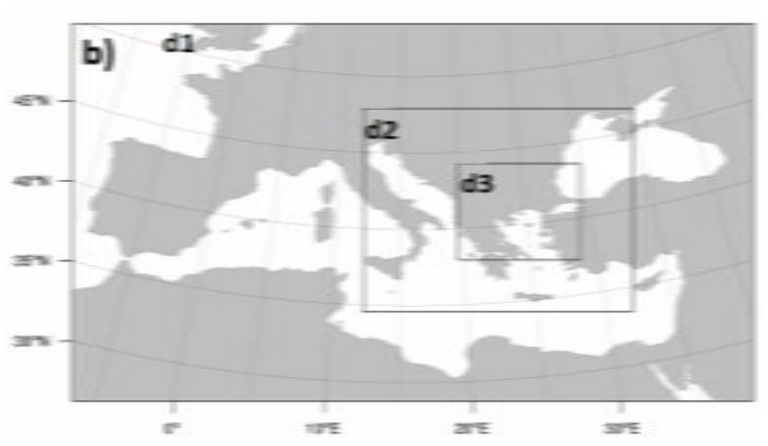
αρχικοποιήθηκαν στις 00:00 UTC 7 του Οκτωβρίου του 2006 και διήρκεσαν για 48 ώρες. Τα GFS $1^\circ \times 1^\circ$ πλεγματικά πεδία ανάλυσης σε διαστήματα 6 ωρών χρησιμοποιούνται για αρχικές και τις οριακές συνθήκες. Τα συστήματα μικροφυσικής που εξετάζονται στην παρούσα μελέτη είναι τα ETA Ferrier, PLIN, WAM6 και έχουν αξιολογηθεί σε πολλά αριθμητικά πειράματα (Jankov et al . 2007 , Hong et al . 2009 , Lin και Colle 2009). Η ETA Ferrier (Ferrier et al . 2002) έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι υπολογιστικά αποδοτική για χρήση σε ένα ευρύ φάσμα των αριθμητικών μοντέλων πρόγνωσης καιρού (Skamarock et al . 2008).

Παρατηρήσεις υετού από 7 μετεωρολογικούς σταθμούς στη χερσόνησο της Χαλκιδικής (βλέπε σχήμα . 5.4 α) χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση με τα αποτελέσματα του μοντέλου από το πλέγμα υψηλής ανάλυσης (3×3 χλμ.) και την πραγματοποίηση επαλήθευσης για τις έντονες βροχοπτώσεις. Οι διαθέσιμοι σταθμοί είναι στο Στρατώνι, Ολυμπιάδα, Σκουριές οι οποίοι λειτουργούν από τη Hellas - Gold Company , ο σταθμός Γομάτι λειτουργείται από την Γεωπονική Σχολή του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, του Βατοπεδίου και του Αγ. Παύλου. Επίσης, σταθμοί λειτουργούν και από το Ελληνικό Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων και τον Πολύγυρο αλλά ωστόσο, σταθμός έχει λειτουργήσει και από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (www.meteo.gr). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μόνο 24 ώρες συσσωρευμένες τιμές βροχόπτωσης είναι διαθέσιμες για το σταθμό του Πολυγύρου. Παρά το γεγονός ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρήθηκαν στο ανατολικό τμήμα της χερσονήσου, μεγάλη βροχόπτωση καταγράφηκε και στους άλλους σταθμούς, προκαλώντας σοβαρές εκτεταμένες πλημμύρες σε πολλές περιοχές. Μεγάλες ζημιές σε ιδιωτικές περιουσίες και υποδομές αναφέρθηκαν ειδικά στο περιφερειακό δίκτυο μεταφορών όπου κάποιες γέφυρες κατέρρευσαν.



ΣΧΗΜΑ 5.4 : α) Ορογραφία (ύψος εδάφους σε μέτρα) της Χαλκιδικής, στην χερσόνησο, όπως ερμηνεύεται από το WRF μοντέλο. Τα κεφαλαία γράμματα

υποδεικνύουν τις θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών. Α: Στρατώνι, Β: Ολυμπιάδα, C: Σκουριές, D: Πολύγυρος, E: Βατοπαιδίου, F: Γομάτι και G: Άγιος Παύλος. Πηγή : Ευσταθίου κ.α, (2012)



ΣΧΗΜΑ 5.4 : β) περιοχές WRF χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη αυτή. Πηγή : Ευσταθίου κ.α, (2012)

Αποτελέσματα

Σε αυτή τη μελέτη , παρουσιάζονται τα προκαταρκτικά αποτελέσματα από την προσομοίωση μιας έντονης βροχόπτωσης χρησιμοποιώντας τρία λειτουργικά συστήματα μικροφυσικών πάνω από την ορεινή περιοχή της Χαλκιδικής. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου υψηλής ανάλυσης με διαθέσιμες μετρήσεις βροχόμετρο αποδεικνύεται ότι:

1 . Όλα τα σχήματα Μικροφυσικής υπερεκτιμούν την ελαφρά έως μέτρια βροχόπτωση και υποεκτιμούν την ισχυρή ωριαία βροχόπτωση (π.χ. Μαζαράκης et al . 2009). Το ETA παρέχει την καλύτερη βαθμολογία για τα υψηλότερα ποσοστά βροχόπτωσης με μικρή αρνητική προκατάληψη.

2 . Το WSM6 και το ETA συστήματα παράγουν υψηλές συγκεντρώσεις και υπερεκτιμούν τις 24 ώρες βροχοπτώσεις σε όλους τους σταθμούς. Το PLIN προσομοιώνει την 24h συνολική βροχόπτωση στην Ολυμπιάδα και Σκουριές , όπου παρατηρήθηκε μέγιστη βροχόπτωση .

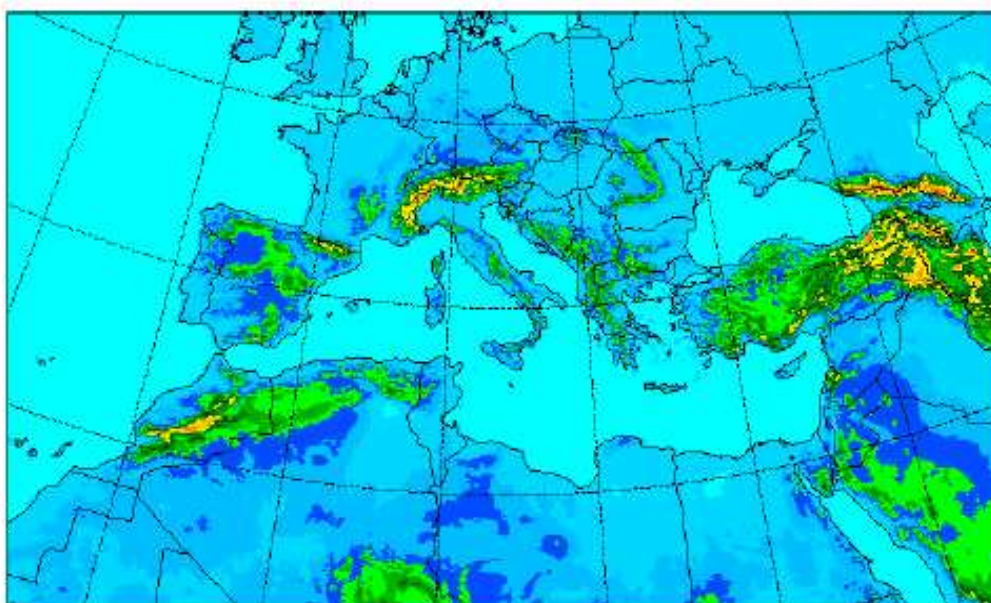
5.3 Η εφαρμογή συστήματος αφομοίωσης δεδομένων και η επίδραση του στην προγνωστική ικανότητα ενός ατμοσφαιρικού μοντέλου περιορισμένης περιοχής

Τα συστήματα αφομοίωσης δεδομένων αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιούνται με σκοπό την παραγωγή πεδίων ανάλυσης υψηλής χωροχρονικής κλίμακας καθώς και την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων κατά το στάδιο της αρχικοποίησης των ατμοσφαιρικών μοντέλων (Κατσαφάδος κ.α. 2008). Τα συστήματα αυτά συνδυάζουν παρατηρήσεις εδάφους και ανώτερης ατμόσφαιρας με δεδομένα αραιού πλέγματος για την παραγωγή αντικειμενικών αναλύσεων σε πραγματικό χρόνο. Στην παρούσα μελέτη ερευνάται η συνδυασμένη εφαρμογή ενός τρισδιάστατου συστήματος αφομοίωσης δεδομένων (LAPS) με το περιορισμένης περιοχής ατμοσφαιρικό μοντέλο Skiron. Ειδικότερα, κατά την αρχικοποίησή του με αναλύσεις οι οποίες προέρχονται από το σύστημα αφομοίωσης δεδομένων για μία εκτεταμένη περιοχή της Μεσογείου καταγράφονται τα αποτελέσματα στην προγνωστική ικανότητα του μοντέλου Skiron. Στην παραγωγή βραχυπρόθεσμων προγνώσεων από το ατμοσφαιρικό μοντέλο η μεθοδολογία συνίσταται στη χρήση αναλύσεων η οποίες όμως είναι διαφορετικής φύσεως. Πιο συγκεκριμένα, μία ομάδα προσομοιώσεων με το μοντέλο Skiron έχει βασιστεί σε αναλύσεις όπου δημιουργήθηκαν από το σύστημα αφομοίωσης δεδομένων, ενώ μία άλλη ομάδα προσομοιώσεων μεταχειρίζεται ως αρχικές συνθήκες πεδία ανάλυσης αραιού πλέγματος όπου προέρχονται από το NCEP. Στα προγνωστικά πεδία GFS/NCEP στηρίζεται η ανανέωση των πλευρικών οριακών συνθηκών των δύο ομάδων προσομοιώσεων. Η απόκριση στις διαφορετικές αρχικοποιήσεις της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου υπολογίστηκε μέσω πλήθους στατιστικών ελέγχων.

ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΣΤΟΧΩΝ-ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Σε αυτή την μελέτη εφαρμόστηκε ένα τρισδιάστατο σύστημα αφομοίωσης δεδομένων (Limited Area Prediction System-LAPS) σε συνδυασμό με το περιορισμένης περιοχής ατμοσφαιρικό μοντέλο Skiron. Το σύστημα Skiron στην πιο τελευταία μορφή του ακολουθεί τη μη υδροστατική προσέγγιση (Janjic et al., 2001) ενώ τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει βελτιώσεις όπου αφορούν τα σχήματα παραμετροποίησης των επιφανειακών ροών, της κατακόρυφης τυρβώδους ανάμιξης και του ενεργειακού ισοζυγίου στην επιφάνεια του εδάφους (Papadopoulos et al., 2002 Katsafados, 2003). Η μακρόχρονη εφαρμογή των ερευνητικών και επιχειρησιακών δραστηριοτήτων έχει επιτρέψει τη βελτίωση και το

συνεχή έλεγχο της αξιοπιστίας του (Kallos et al., 1997). Το σύστημα LAPS είναι ένα σύστημα αφομοίωσης δεδομένων μέσης κλίμακας το οποίο έχει την δυνατότητα να διαχειριστεί πλήθος μετεωρολογικών δεδομένων (παρατηρήσεις εδάφους και ανώτερης ατμόσφαιρας, ραντάρ, δορυφορικά δεδομένα κτλ.) όπου σκοπό έχει την παραγωγή τρισδιάστατων ατμοσφαιρικών πεδίων ανάλυσης (Albers, 1995). Η ιδιαίτερα υψηλή χωροχρονική ανάλυση των πεδίων όπου είναι δυνατόν να παρέχει το LAPS επιτρέπει την επανάληψη μέσης κλίμακας ατμοσφαιρικών διεργασιών και συνεπώς μπορεί να εφαρμοστεί για την αρχικοποίηση περιορισμένης περιοχής ατμοσφαιρικών μοντέλων (Hiemstra et al., 2006). Η αποτίμηση των επιπτώσεων στην προγνωστική ικανότητα του μοντέλου Skiron έρχεται από το συνδυασμό με το σύστημα LAPS. Κυρίως, η μεθοδολογία συνίσταται στην εφαρμογή με αναλύσεις διαφορετικής φύσεως του ατμοσφαιρικού μοντέλου με σκοπό την παραγωγή βραχυπρόθεσμων προγνώσεων. Ωστόσο, οι αναλύσεις όπου προέρχονται από το NCEP έχουν οριζόντια διακριτοποίηση πλέγματος $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ και 26 κατακόρυφα επίπεδα ενώ οι αντίστοιχες του LAPS, $15\text{km} \times 15\text{km}$ και 22 κατακόρυφα επίπεδα. Αφομοιώνονται μετρήσεις από περίπου 620 επίγειους σταθμούς μέτρησης (METAR, SYNOP) ανά διακριτές χρονικές περιόδους και από περίπου 25 σταθμούς ανώτερης ατμόσφαιρας. Η ανανέωση των πλευρικών οριακών συνθηκών των δύο ομάδων προσομοιώσεων έχει βασιστεί στα προγνωστικά πεδία του μοντέλου GFS/NCEP. Η περιοχή ολοκλήρωσης του μοντέλου Skiron καλύπτει τη Μεσόγειο και την Ευρώπη (Σχήμα 5.5) με οριζόντια χωρική διακριτοποίηση $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ ενώ η κατακόρυφη διακριτοποίηση του μοντέλου περιλαμβάνει 50 ασύμμετρα επίπεδα μέχρι τα 50hPa.

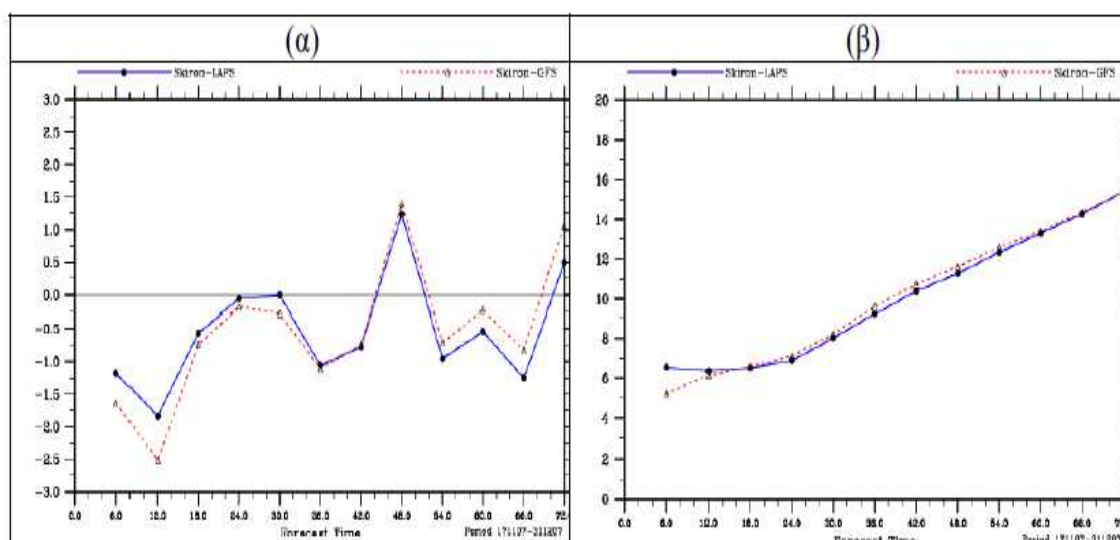


ΣΧΗΜΑ 5.5 : Πεδίο ολοκλήρωσης του μοντέλου Skiron. Πηγή: Κατσαφάδος κ.α, 2008

Η κοινή περίοδος προσομοίωσης των δύο ομάδων (Skiron-LAPS) και (Skiron- GFS) είναι από 17 Νοεμβρίου έως 31 Δεκεμβρίου 2007 (συνολικά 45 ημέρες) ενώ ο προγνωστικός ορίζοντας κάθε προσομοίωσης είναι 72 ώρες οι οποίες βασίζονται στον ημερήσιο κύκλο ανάλυσης 18:00UTC. Το σύνολο των προσομοιώσεων προέρχεται από την επιχειρησιακή λειτουργία του μοντέλου Skiron στα πλαίσια του προγράμματος Poseidon II. Αναπτύχθηκε μεθοδολογία και λογισμικό στατιστικής ανάλυσης, για την εκτίμηση της απόκρισης της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου Skiron στις διαφορετικές αρχικοποιήσεις. Στο πλαίσιο της διαδικασίας αξιολόγησης συνεχών μετεωρολογικών μεταβλητών υπολογίζονται το συστηματικό σφάλμα (BIAS) και η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error- RMSE).

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΔΙΩΝ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

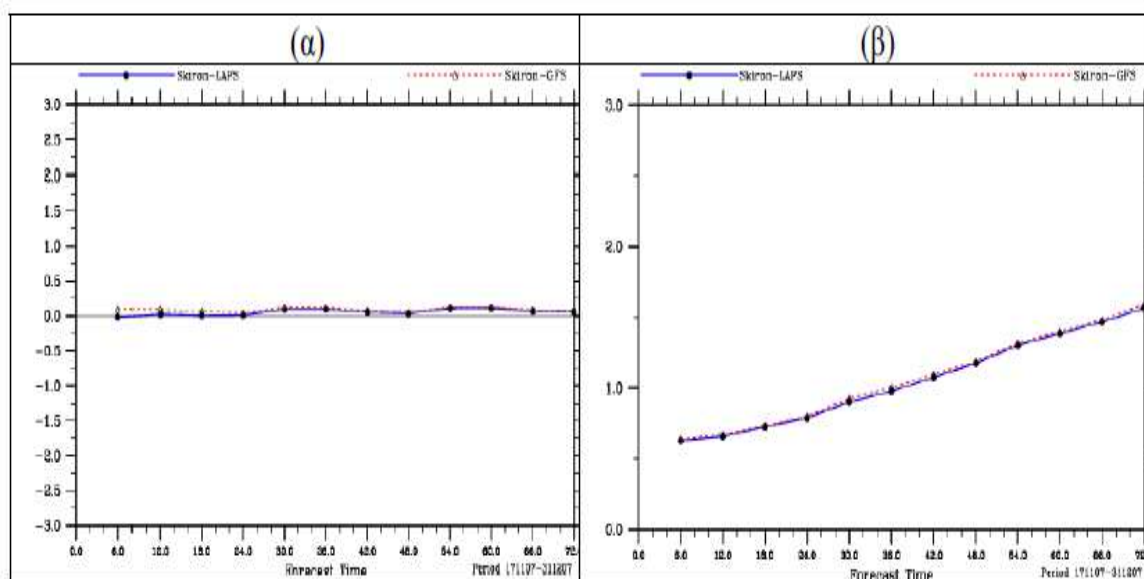
Εκτιμήθηκαν οι προγνώσεις του γεωδυναμικού ύψους και της θερμοκρασίας στα 500 και 850hPa μέσω στατιστικής ανάλυσης των πεδίων ανώτερης ατμόσφαιρας. Οι αναλύσεις του ECMWF με οριζόντια χωρική διακριτοποίηση $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ στις 00, 06, 12 και 18UTC χρησιμοποιήθηκαν καθημερινά από την κοινή περίοδο των προσομοιώσεων ως ανεξάρτητα πεδία αναφοράς. Εφαρμόστηκε η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής στις αναλύσεις του ECMWF ώστε να αναχθούν στην χωρική διακριτοποίηση των προγνωστικών πεδίων του μοντέλου Skiron και να επιτευχθεί η άμεση αντιπαραβολή ανάμεσα στα πεδία πλέγματος.



ΣΧΗΜΑ 5.6 : Χρονική διακύμανση των μέσων τιμών των στατιστικών μεγεθών (α) BIAS και (β) RMSE, γεωδυναμικού ύψους (gpm) στα 850hPa. Τα μεγέθη της ομάδας προσομοιώσεων Skiron-LAPS αποτυπώνονται με συνεχείς καμπύλες μπλε χρώματος

ενώ τα αντίστοιχα των προσομοιώσεων Skiron-GFS με διακεκομμένες καμπύλες κόκκινου χρώματος (Κατσαφάδος κ.α, 2008).

Από τα πρώτα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης μεταξύ των δυο ομάδων προσομοιώσεων δεν αποκαλύπτεται ουσιαστική διαφοροποίηση. Η συστηματική υποεκτίμηση του γεωδυναμικού ύψους στα 850hPa εμφανίζεται συρρικνωμένη στις προσομοιώσεις Skiron-LAPS σε σχέση με τις αντίστοιχες Skiron-GFS (Σχήμα 5.6 α). Αντίστοιχη, ένδειξη παρουσιάζει και το RMSE όπου όμως οι διαφορές για ολόκληρη την προγνωστική περίοδο φανερώνονται σχεδόν αμυδρές (Σχήμα 5.6 β). Κατά το πρώτο δωρο μόνο παρουσιάζεται διαφορά περίπου 2gpm η οποία είναι υπέρ των προσομοιώσεων Skiron-GFS. Αντίθετα, τα αντίστοιχα στατιστικά μεγέθη της θερμοκρασίας στα 500hPa (Σχήμα 5.7) δεν παρουσιάζουν σχεδόν καμία διαφοροποίηση.



ΣΧΗΜΑ 5.7 : Όπως στο Σχήμα 5.6 για (α) BIAS και (β) RMSE, της θερμοκρασίας (K) στα 500hPa. Πηγή : Κατσαφάδος κ.α 2008

Σε αυτή την περίπτωση το σύστημα αφομοίωσης δεδομένων δεν φαίνεται να παρέχει ιδιαίτερη βελτίωση στην προγνωστική ικανότητα του ατμοσφαιρικού μοντέλου κυρίως, λόγω, της έλλειψης ικανού πλήθους παρατηρήσεων ανώτερης

ατμόσφαιρας όπου θα ήταν δυνατόν να αναπαράγουν επιπρόσθετους ατμοσφαιρικούς κυματισμούς σε σχέση με τα πεδία GFS/NCEP. Επίσης, μικρές διαφοροποιήσεις των στατιστικών μεγεθών κατά τις πρώτες ώρες των προσομοιώσεων δεν φαίνονται να επιδρούν ουσιαστικά στο σύνολο της προγνωσιμότητας του ατμοσφαιρικού μοντέλου. Μετά το πέρας του πρώτου 24ώρου, τα στατιστικά μεγέθη και των δύο ομάδων προσομοιώσεων τείνουν να εξομοιωθούν γεγονός που φανερώνει μικρή επίδραση των αρχικών συνθηκών τους.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΔΙΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Η αποτίμηση των προγνωστικών πεδίων επιφανείας γίνεται με χρήση της βάσης δεδομένων του διεθνούς δικτύου επίγειων σταθμών παρατήρησης του World Meteorological Organization (WMO). Από το ECMWF έχουν ληφθεί τα δεδομένα, και πρόκειται για 11 μετρητικούς σταθμούς στην περιοχή της Ελλάδας με χρονικό βήμα τις 3 ώρες. Τα στοιχεία παρατηρήσεων εδάφους αναλύθηκαν και επεξεργάστηκαν, σε συσχέτιση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Μέθοδος παρεμβολής των εκτιμώμενων τιμών του μοντέλου για την άμεση παράθεση των παρατηρήσεων με τις προγνώσεις εφαρμόστηκε από τα τέσσερα γειτονικά σημεία του πλέγματος στις ακριβείς θέσεις των σταθμών παρατήρησης (Paradopoulos et al., 2002). Κατά τη έρευνα των στατιστικών μεγεθών του πεδίου της θερμοκρασίας στα 2 μέτρα εμφανίζεται ουσιαστική βελτίωση της προγνωστικής ικανότητας. Ειδικότερα περιορισμένες τιμές των Bias και RMSE κατά 1°C και 0.4°C αντίστοιχα εμφανίζει η ομάδα προσομοιώσεων Skiron-LAPS αν και συνδυάζεται με συστηματική υπερεκτίμηση των ελαχίστων θερμοκρασιών. Η βελτίωση φανερώνεται κατά το πρώτο 12ωρο των προσομοιώσεων κυρίως όπου και διαγράφεται η βασική περίοδος επίδρασης των αρχικών συνθηκών. Το υπόλοιπο προγνωστικό διάστημα η ομάδα προσομοιώσεων Skiron-LAPS δείχνει συνολικά πιο βελτιωμένη προγνωστική ικανότητα σε σχέση με την αντίστοιχη ομάδα Skiron-GFS όπου οι διαφοροποιήσεις μεταξύ στα στατιστικά τους μεγέθη είναι περιορισμένες. Ωστόσο, ανάλογη συμπεριφορά παρουσιάζεται και στα 10 μέτρα για το πεδίο της έντασης του ανέμου όπου φανερώνονται διαφορές περίπου 0.5m/s κατά το πρώτο τρίωρο οι οποίες μπορούν να αποδοθούν στις βελτιωμένες αρχικές συνθήκες που προσφέρει το σύστημα LAPS. Στα αρχικά πεδία πλέγματος το αρκετά μεγάλο πλήθος παρατηρήσεων εδάφους εμφανίζεται να αναπαράγει υψίσυχη πληροφορία όπου εισάγεται στο σύστημα αφομοίωσης δεδομένων και τελικά στα πεδία επιφανείας οδηγώντας σε βελτιωμένες αναλύσεις.

Με βάση τα αποτελέσματα του μεγέθους ETS, στην εκτιμώμενη ποσότητα υετού διακρίνεται απόκριση που προκύπτει ως αποτέλεσμα των διαφορετικών αρχικοποιήσεων του μοντέλου. Ειδικά, η ομάδα προσομοιώσεων Skiron-LAPS παρουσιάζει βελτιωμένη εκτίμηση των μικρών και μεσαίων υψών υετού. Ωστόσο,

αντίστοιχα αποτελέσματα διακρίνονται και στο σύνολο της προγνωστικής περιόδου (εκτός του τελευταίου 12ωρου) για ύψη τα οποία όμως φτάνουν ή υπερβαίνουν τα 6mm. Τουλάχιστον οριακή βελτίωση στην εκτίμηση του υετού σε σχέση με τις αντίστοιχες Skiron-GFS επιδείχνουν στο σύνολο των περιπτώσεων οι προσομοιώσεις Skiron-LAPS. Καθώς στο σύστημα LAPS δεν αφομοιώνονται άμεσα μετρητικά δεδομένα υετού γι' αυτό η θετική απόκριση στην εκτιμώμενη ποσότητα υετού ενδέχεται να προέρχεται από τη συνολικά καλύτερη αναπαράσταση των επιφανειακών πεδίων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη ερευνήθηκαν σε βάθος οι επιδράσεις ενός ατμοσφαιρικού μοντέλου στην προγνωστική ικανότητα περιορισμένης περιοχής από την εφαρμογή αναλύσεων ιδιαίτερα υψηλής χωρικής διακριτοποίησης. Από τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης παρουσιάζεται βελτίωση της προγνωσιμότητας η οποία κυρίως στα επιφανειακά πεδία είναι διακριτή. Από το σύστημα LAPS προέρχονται η αφομοίωση ικανού πλήθους μετρητικών δεδομένων επιφανείας η οποία έχει ως αποτέλεσμα να αναπαράγει υψίσυχνα κύματα στα πεδία ανάλυσης το οποίο συνεπάγεται βελτιωμένη αρχικοποίηση του μοντέλου Skiron. Παρατηρήθηκε ότι η μνήμη των αρχικών συνθηκών του μοντέλου έχει διάρκεια μέχρι το εύρος των πρώτων 24 ωρών. Η απόδοση μπορεί να οφείλεται αφενός στην περιορισμένη διαφοροποίηση μεταξύ των αναλύσεων LAPS και GFS/NCEP, η οποία είναι σχεδόν ανύπαρκτη στην ανώτερη ατμόσφαιρα και αφετέρου στην επίδραση των κοινών οριακών συνθηκών που εισάγονται στο πεδίο ολοκλήρωσης (Κατσαφάδος κ.α, 2008).

5.4 Αξιολόγηση του μοντέλου WRF σε περίπτωση έντονου επεισοδίου ανέμου Βαρδάρη

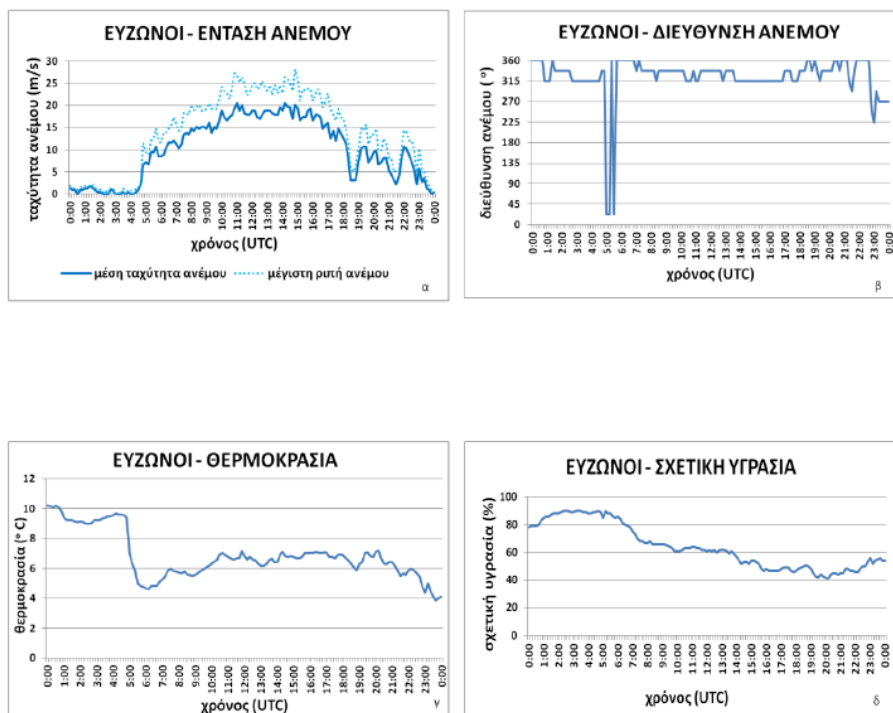
Αυτή η εργασία των Τσοπουρίδη κ.α (2012) παρουσιάζει μια μελέτη της περίπτωσης ενός επεισοδίου του ανέμου Βαρδάρη το οποίο εμφανίστηκε στις 10 Νοεμβρίου 2007 και προκάλεσε εκτεταμένα προβλήματα στην Κεντρική Μακεδονία. Ο άνεμος που ονομάζεται Βαρδάρης είναι ένας ισχυρός βορειοδυτικός τοπικός άνεμος που πνέει κατά μήκος της κοιλάδας του Αξιού στα νότια Βαλκάνια. Μετά την κοιλάδα του Αξιού επηρεάζει την Θεσσαλονίκη ως βορειοδυτικός άνεμος. Χαρακτηρίζεται από τη βόρεια-βορειοδυτική κατευθυνσή του, την ισχυρή ένταση, τις χαμηλές θερμοκρασίες και τη χαμηλή υγρασία. Παρά τη σημασία του, υπάρχουν μόνο λίγες μελέτες σχετικά με τον άνεμο Βαρδάρης (Αγγουριδάκης et al . 1981 , Μαχαίρας et al . 1984 , Ψάρρη 2005). Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει έλλειψη λεπτομερών έρευνας υψηλής ανάλυσης της χωροχρονικής της εξέλιγής του και του σχετικού ρόλου των συνοπτικών και των τοπικών συνθηκών για την ανάπτυξή του, παρέχοντας ένα ισχυρό κίνητρο για να μελετηθεί αυτό το φαινόμενο. Στη μελέτη των Τσοπουρίδη κ.α. (2012) χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα τεσσάρων επιφανειακών μετεωρολογικών σταθμών κατά μήκος της κοιλάδας του Αξιού (στους Ευζώνους, Αξιούπολη, Ακροπόταμο, και Κύμινα), αναλύσεις και το μη υδροστατικό μοντέλο WRF. Το επεισόδιο σχετίζεται με το συνδυασμό ενός βαρομετρικού χαμηλού που επηρέασε όλη την Ελλάδα και ενός αντικυκλώνα στη Δυτική Ευρώπη. Η μέγιστη σταθερή ταχύτητα του ανέμου που εμφανίστηκε κατά μήκος του Αξιού ήταν $20,5 \text{ m/s}$ με ριπές στα 28.2 m/s ενώ στο αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης (ήταν 24 m/s , με ριπές έως τα 31.9 m/s). Οι προσομοιώσεις με οριζόντια ανάλυση 1 χιλιομέτρου ήταν σε καλή συμφωνία με τις παρατηρήσεις. Οι ισχυρότεροι άνεμοι, άνω των $30\text{-}35 \text{ m/s}$, προσομοιώθηκαν μεταξύ $750\text{-}900 \text{ hPa}$, με τη μορφή ενός αεροχειμάρρου.

Δεδομένα και Μεθοδολογία

Η έρευνα βασίστηκε σε αριθμητικές προσομοιώσεις, παρατηρήσεις δεδομένων και σε πλεγματικές αναλύσεις. Πραγματοποιήθηκε μη υδροστατική Έρευνα της Πρόβλεψης του Καιρού με το μοντέλο Advanced Research dynamic (WRF - ARW Version 3.2.0) όπου χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις (Wang et al . 2010). Οι παρατηρήσεις είναι συνήθως διαθέσιμες μετρήσεις της επιφάνειας των δικτύων από την Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσία Hellenic (EMY), τον Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας (DMC / ΑΠΘ), την Γεωπονικής Σχολής του

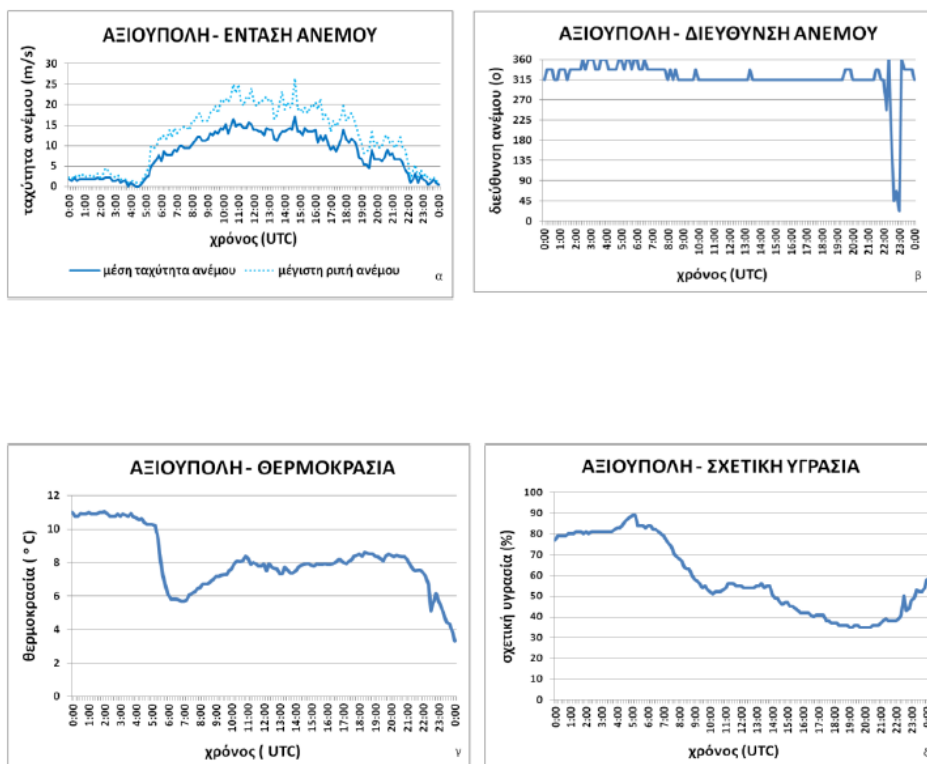
Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκη, το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (ΕΑΑ) , τον Ελληνικό Γεωργικό Οργανισμό Ασφαλίσεων (ΕΛΓΑ), την Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας καθώς και από τέσσερις αυτόματους μετεωρολογικούς σταθμούς που λειτουργούν κατά μήκος της κοιλάδας του Αξιού σε ένα κοινό σκοπό μεταξύ DMC / ΑΠΘ και της ΝΟΑ (Σχήμα 5.8). Αυτοί οι τέσσερις σταθμοί ήταν σε στασιμότητα στις περιοχές των Ευζώνων , Αξιούπολη, Ακροπόταμο και Κύμινα και καλύπτουν ολόκληρη την περιοχή ενδιαφέροντος της Ελλάδας. Τα στοιχεία της Γευγελής (ΠΓΔΜ) ανακτήθηκαν από GTS προκειμένου να καλυφθούν τα ανάντη της περιοχή. Οι παρατηρήσεις χρησιμοποιούνται μαζί με αναλύσεις της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας του Ηνωμένου Βασιλείου (UKMO) για τη μέση πίεση της στάθμης της θάλασσας και δικτυώνονται η 6-ώρες λειτουργίες της επιφάνειας και της ανώτερης ατμόσφαιρας όπου είναι αναλύσεις του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προγνώσεων (ECMWF). Αυτές ήταν διαθέσιμες σε ένα κανονικό πλέγμα των $0,25^\circ \text{ Lat} \times 0,25^\circ \text{ Lon}$ στα επίπεδα πίεσης του 1000 , 925 , 850 , 700 , 500 , 400 , 300 , 250 , 200 , 150 , 100 , 70 και 50 hPa.

Εύζωνοι



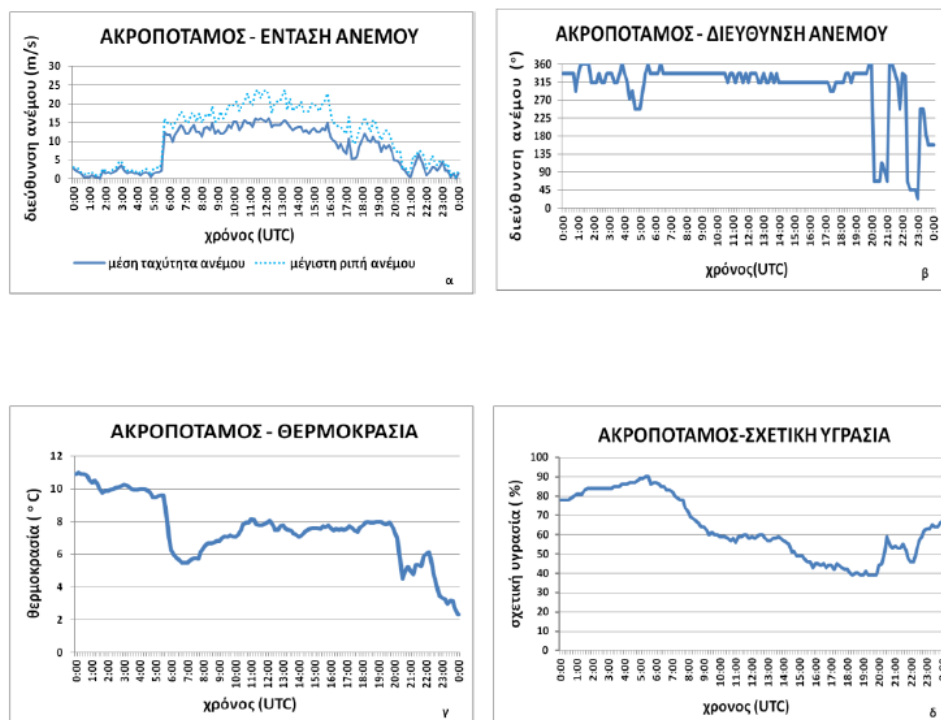
Σχήμα 5.8 : Διαγράμματα που απεικονίζουν α) τη μέση ταχύτητα και μέγιστη ριπή του ανέμου (σε m/sec) β), τη διεύθυνση του ανέμου (σε μοίρες) , γ) τη θερμοκρασία (ο C) και δ) τη σχετική υγρασία (%) στο σταθμό των Ευζώνων από τις 10/11/07 στις 00 UTC μέχρι τις 11/11/07 στις 00 UTC. Πηγή: Τσοπουρίδης, 2014

Αξιούπολη



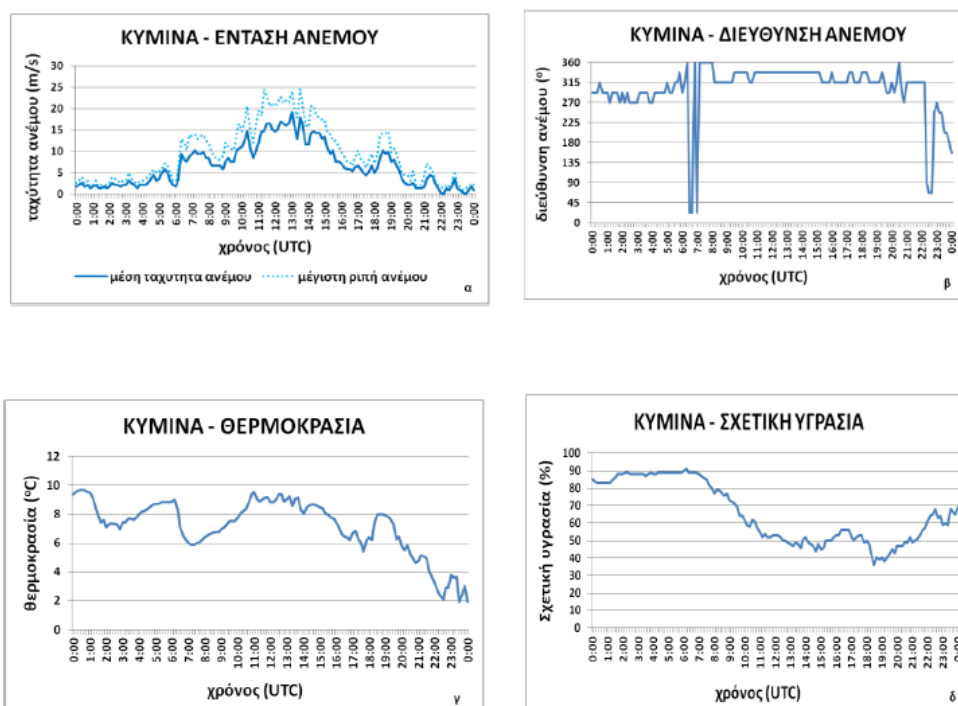
Σχήμα 5.9 : Διαγράμματα που απεικονίζουν α) τη μέση ταχύτητα και μέγιστη ριπή του ανέμου (σε m/sec) β), τη διεύθυνση του ανέμου (σε μοίρες) , γ) τη θερμοκρασία (ο C) και δ) τη σχετική υγρασία (%) στο σταθμό της Αξιούπολης από τις 10/11/07 στις 00 UTC μέχρι τις 11/11/07 στις 00 UTC. Πηγή: Τσοπουρίδης, 2014

Ακροπόταμος



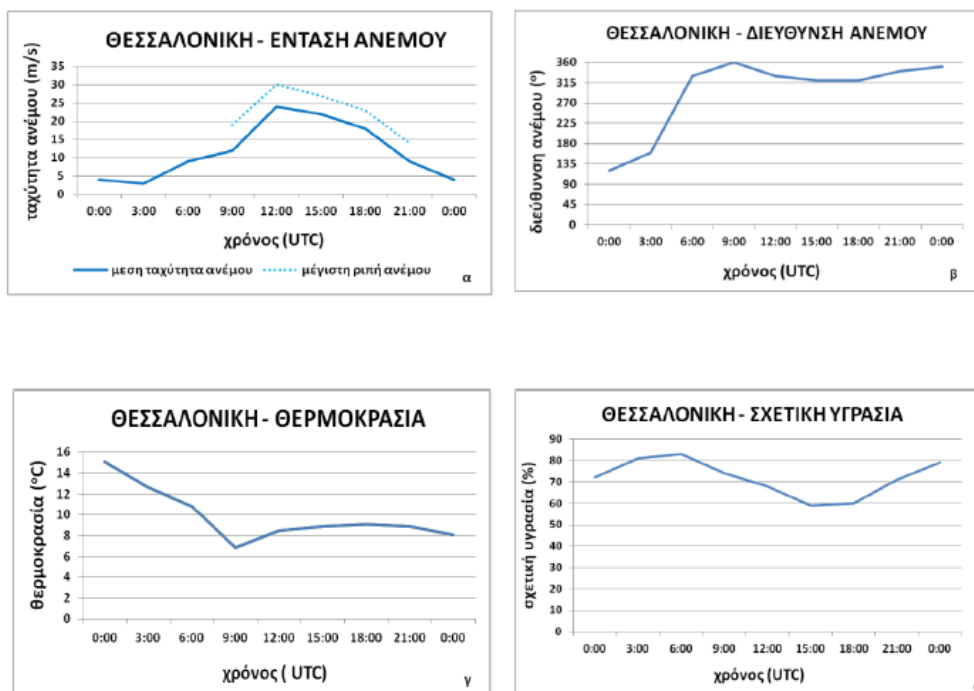
Σχήμα 5.10 : Διαγράμματα που απεικονίζουν α) τη μέση ταχύτητα και μέγιστη ριπή του ανέμου (σε m/sec) β), τη διεύθυνση του ανέμου (σε μοίρες) , γ) τη θερμοκρασία (ο C) και δ) τη σχετική υγρασία (%) στο σταθμό του Ακροποτάμου από τις 10/11/07 στις 00 UTC μέχρι τις 11/11/07 στις 00 UTC Πηγή: Τσοπουρίδης, 2014

Κόμινια



Σχήμα 5.11 : Διαγράμματα που απεικονίζουν α) τη μέση ταχύτητα και μέγιστη ριπή του ανέμου (σε m/sec) β), τη διεύθυνση του ανέμου (σε μοίρες) , γ) τη θερμοκρασία (ο C) και δ) τη σχετική υγρασία (%) στο σταθμό των Κυμίνων από τις 10/11/07 στις 00 UTC μέχρι τις 11/11/07 στις 00 UTC. Πηγή: Τσοπουρίδης, 2014

Θεσσαλονίκη



Σχήμα 5.12 : Διαγράμματα που απεικονίζουν α) τη μέση ταχύτητα και μέγιστη ριπή του ανέμου (σε m/sec) β), τη διεύθυνση του ανέμου (σε μοίρες) , γ) τη θερμοκρασία (ο C) και δ) τη σχετική υγρασία (%) στο σταθμό της Θεσσαλονίκης από τις 10/11/07 στις 00 UTC μέχρι τις 11/11/07 στις 00 UTC. Πηγή: Τσοπουρίδης, 2014

Μετά από την μελέτη των σχημάτων 5.8 – 5.12 μπορούν να προκύψουν τα παρακάτω συμπεράσματα. Όσον αφορά τη χρονική εξέλιξη της ταχύτητας του ανέμου στα 10 μέτρα, η έναρξη του φαινομένου ξεκίνησε στο σταθμό των Ευζώνων, δηλαδή τον βορειότερο σταθμό εντός Ελλάδος, περίπου στις 04:40 UTC (σχήμα 5.8α) και στους σταθμούς των Κυμίνων και της Θεσσαλονίκης γύρω στις 06:00 UTC (σχήματα 5.11α και 5.12α). Οπότε, έχοντας τη θέση των σταθμών κατά μήκος της κοιλάδας του Αξιού ως κριτήριο, γίνεται εμφανής από τα βορειοδυτικά προς τα νοτιοανατολικά μια σταδιακή ενίσχυση του ανέμου.

Σε όλους τους σταθμούς η ταχύτητα του ανέμου ξεπέρασε τα 15 m/sec, ενώ ξεπέρασε τα 10-11 m/sec (που αντιστοιχεί σε ισχυρούς ανέμους στην κλίμακα Beaufort, ≥ 6 BF- (Μακρογιάννης και Σαχσαμάνογλου, 2004) για περίπου 12, 10, 10, 5, 10 ώρες στους σταθμούς των Ευζώνων της Αξιούπολης, του Ακροποτάμου, των Κυμίνων και του αεροδρομίου της Θεσσαλονίκης, αντίστοιχα. Αυτό το γεγονός επαληθεύει, τόσο την ένταση όσο, και τη διάρκεια του φαινομένου.

Κατά μήκος της κοιλάδας του Αξιού και ιδίως στο σταθμό των Ευζώνων (20.5 m/s με μέγιστες ριπές που ξεπέρασαν τα 28.2 m/s) καθώς και στον σταθμό της Θεσσαλονίκης (24 m/s με ριπές που άγγιξαν τα 31.9 m/s). (σχήματα 5.8α-5.12α) παρουσιάστηκαν οι υψηλότερες τιμές ταχύτητας του ανέμου ίσως λόγω της παραθαλάσσιας τοποθεσίας του σταθμού και της ύπαρξης μικρότερης τριβής. Ωστόσο, από τον Βαρδάρη επηρεάστηκε ολόκληρη σχεδόν η περιφέρεια της Κεντρικής Μακεδονίας, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 5.13.



Σχήμα 5.13 : Η μέγιστη παρατηρούμενη σταθερή ταχύτητα ανέμου (m / s) και ριπή ανέμου (m / s) στα 10m. Πηγή: Τσοπουρίδης, 2014

Όσον αφορά τη διεύθυνση του ανέμου μπορούν να προκύψουν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Σχετικά με το σύνολο των 4 σταθμών εντός της κοιλάδας του Αξιού, ο άνεμος ήδη από τις 10/11/07 00UTC είχε αλλάξει κατεύθυνση σε βορειοδυτικό και παρέμεινε βορειοδυτικός μέχρι το τέλος περίπου της συγκεκριμένης ημέρας (σχήματα 5.8 β- 5.11β), ενώ στο σταθμό της Θεσσαλονίκης ο άνεμος αρχικά είχε μια διεύθυνση προς τα νότια μέχρι περίπου και τις 05 UTC ο οποίος σε ένα χρονικό διάστημα γύρω στη μια ώρα στράφηκε και στην περίπτωση αυτή σε βορειοδυτικό (σχήμα 5.12 β).

Ωστόσο, και στους 5 σταθμούς αναφοράς με τη μεταβολή της θερμοκρασίας, παρατηρήθηκε μείωση αυτής περίπου μισή ώρα μετά την εκδήλωση του ανέμου Βαρδάρη. Είχαμε μείωση της θερμοκρασίας στους ακόλουθους σταθμούς με πτώση 5 βαθμών στους Εύζωνες (σχήμα 5.8γ), 4 βαθμών στην Αξιούπολη (σχήμα 5.9γ), τον Ακροπόταμο (σχήμα 5.10γ) και την Μίκρα (σχήμα 5.12γ) και 3 βαθμών στο σταθμό των Κυμίνων (σχήμα 5.11γ).

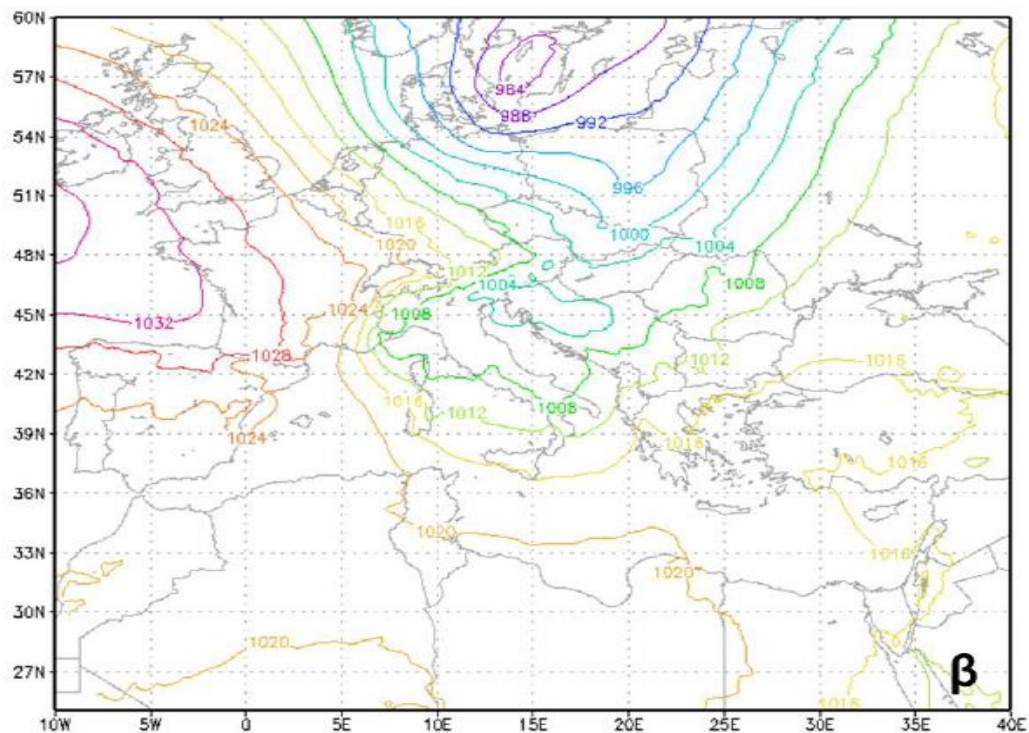
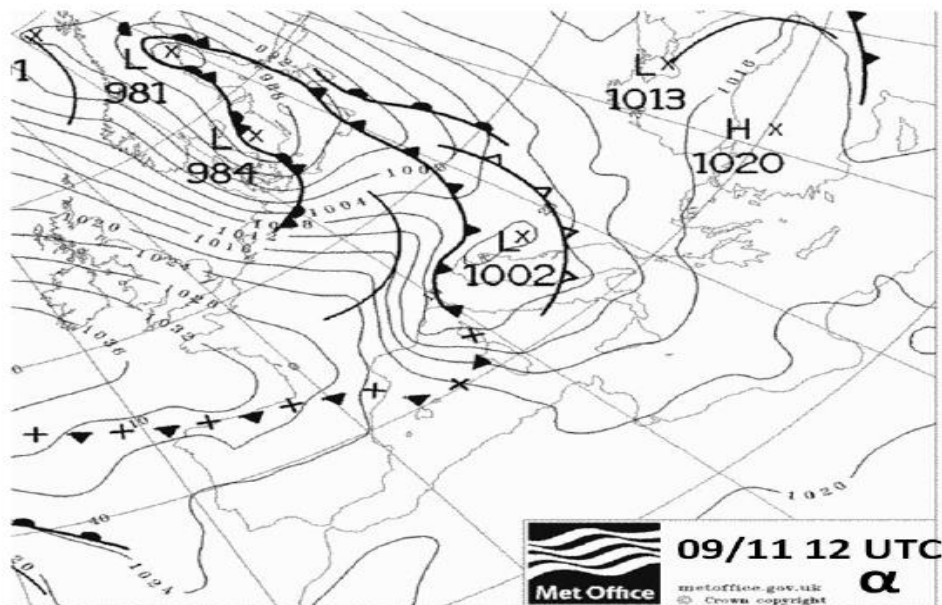
Αξιολόγηση του μη υδροστατικού αριθμητικού μοντέλου WRF-ARW

Στα παρακάτω σχήματα γίνεται μία σύγκριση των μετεωρολογικών πεδίων που προέρχονται από τις αναλύσεις του ECMWF με χωρική ανάλυση $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ και των αντίστοιχων προγνώσεων του περιοχικού μοντέλου WRF-ARW. Τα πεδία που αναλύονται είναι αυτά της ατμοσφαιρικής πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας και του γεωδυναμικού ύψους στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 mb. Αυτό έχει ως σκοπό να αξιολογηθεί ο βαθμός στον οποίο το περιοχικό μοντέλο WRF κατέγραψε τη συνοπτική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας στο συγκεκριμένο αυτό έντονο φαινόμενο Βαρδάρη. Η ανάλυση βασίζεται εξ' ολοκλήρου στη μελέτη του Τσοπουρίδη (2014).

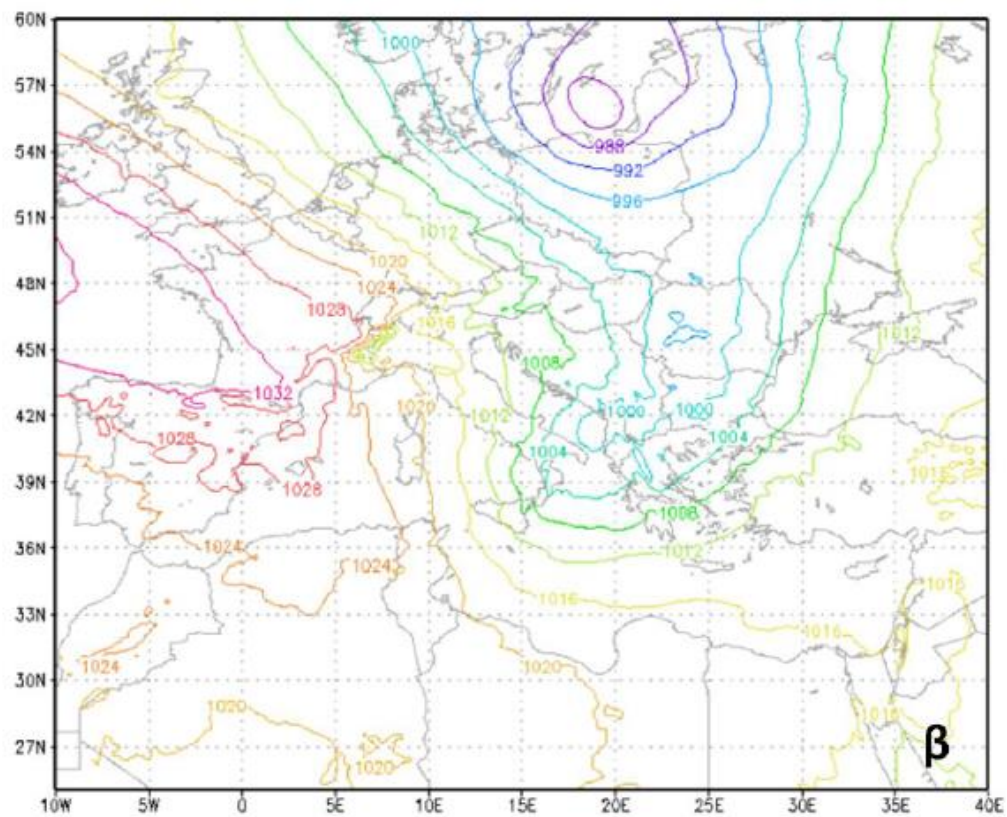
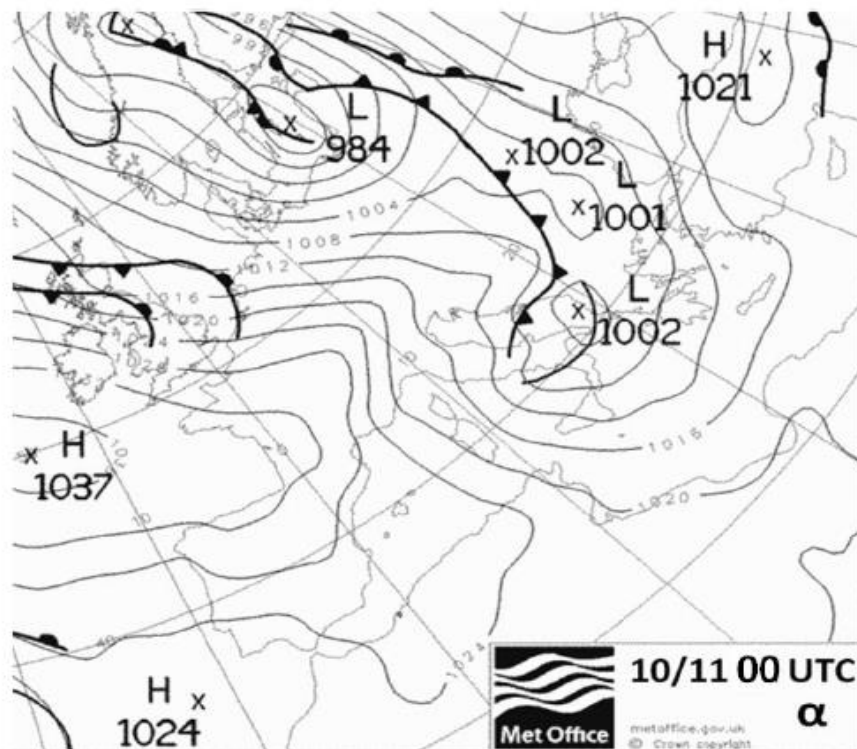
Σύγκριση αναλύσεων και προσομοιώσεων του αριθμητικού μοντέλου WRF-ARW

Παρουσιάζεται μια αξιολόγηση του μη υδροστατικού αριθμητικού μοντέλου WRF-ARW, στην οποία συγκρίνονται οι προγνώσεις του μοντέλου με τις αναλύσεις. Αυτό έχει ως σκοπό να εκτιμηθεί η ακρίβεια της πρόγνωσης στη συνοπτική κλίμακα. Στα παρακάτω σχήματα πραγματοποιείται μία σύγκριση ανάμεσα στις εικόνες οι οποίες προέρχονται από τις αναλύσεις του ECMWF με χωρική ανάλυση $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ και των εικόνων όπου προέκυψαν από το περιοχικό μοντέλο WRF-ARW για δύο πολύ βασικά πεδία αντίστοιχα. Αυτά τα δυο βασικά πεδία είναι της ατμοσφαιρικής πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας και του γεωδυναμικού ύψους στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 mb με σκοπό να εκτιμηθεί με μία αρχική γενική σκοπιά ο βαθμός που το περιοχικό μοντέλο αποτύπωσε τη συνοπτική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας στο συγκεκριμένο έντονο φαινόμενο του Βαρδάρη.

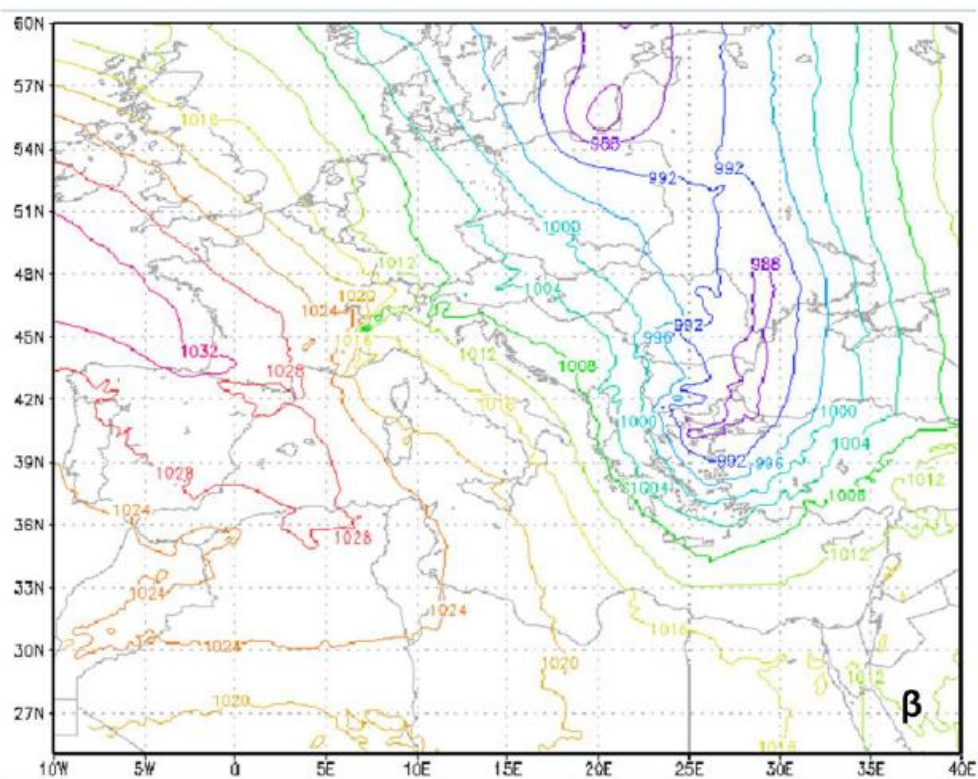
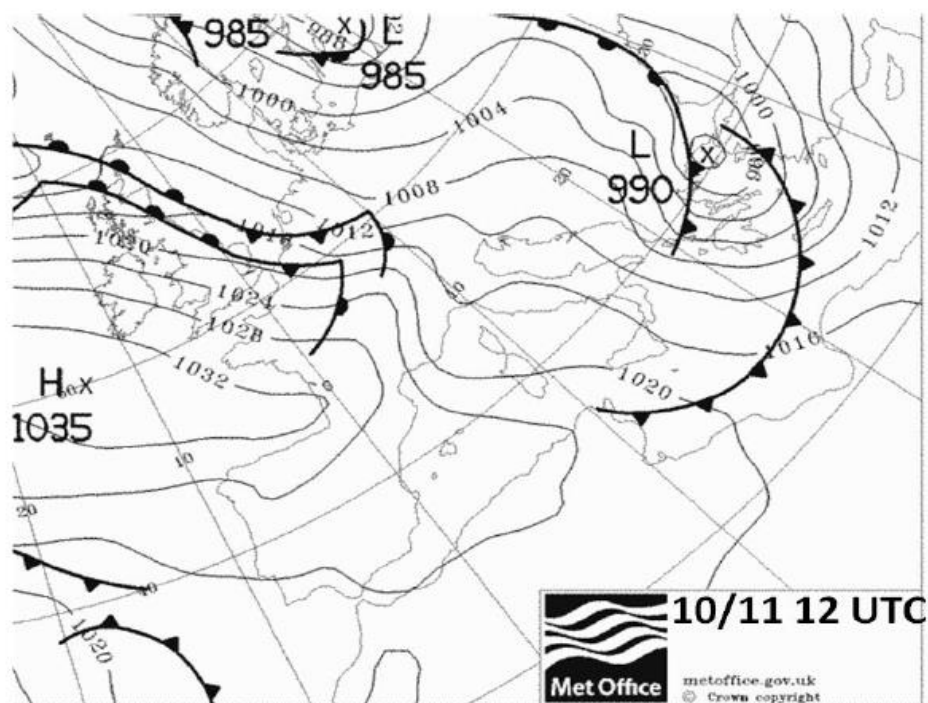
- ΠΕΔΙΟ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΣΗ ΣΤΑΘΜΗ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ



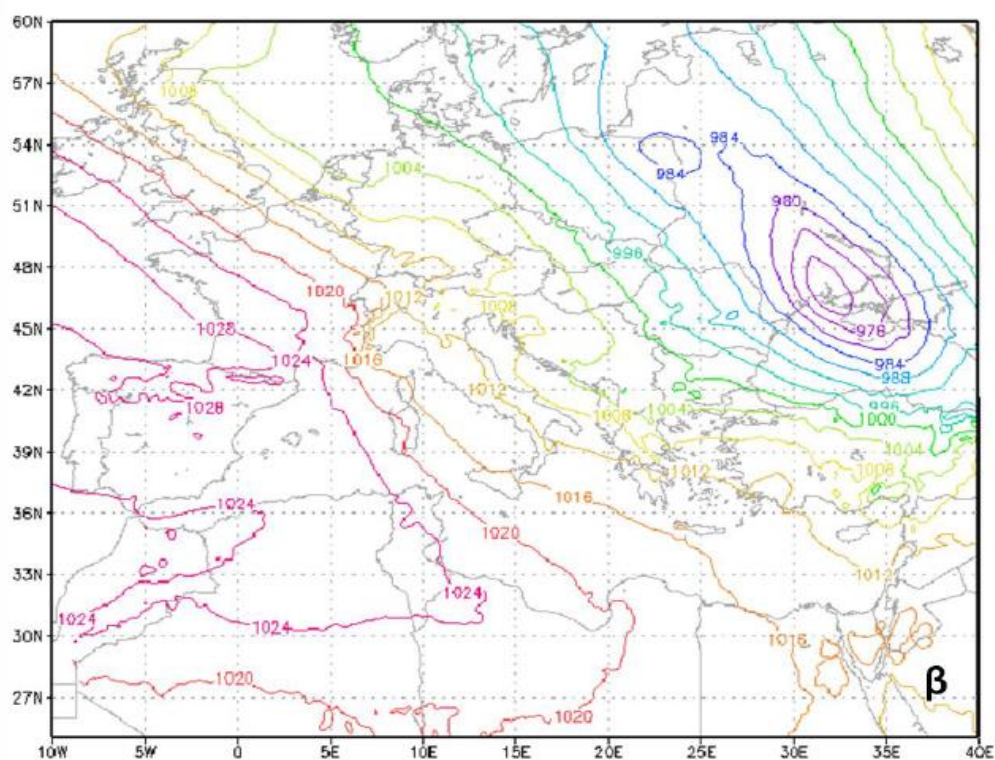
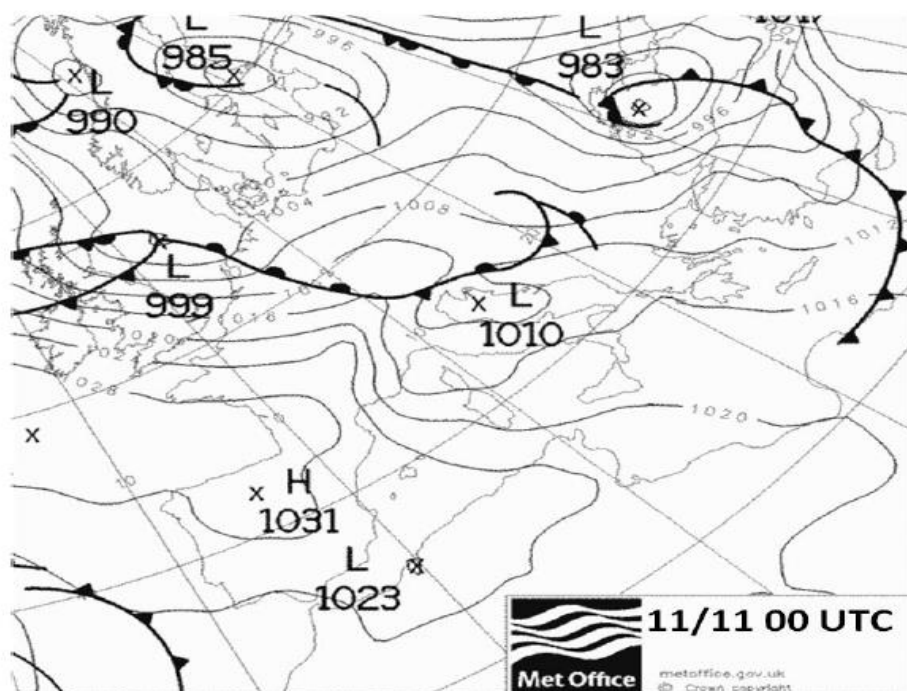
Σχήμα 5.14 : Πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa) στις 12 UTC 09/11/07 α) από τις αναλύσεις του UKMO και β) από την προσομοίωση του WRF κατά την αρχικοποίησή του. Πηγή: Τσοπουρίδης, 2014



Σχήμα 5.15 : Πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa) στις 00 UTC 10/11/07:α) από τις αναλύσεις του UKMO και β) από την προσομοίωση του WRF κατά την 12η προγνωστική ώρα. Πηγή: Τσοπουρίδης, 2014



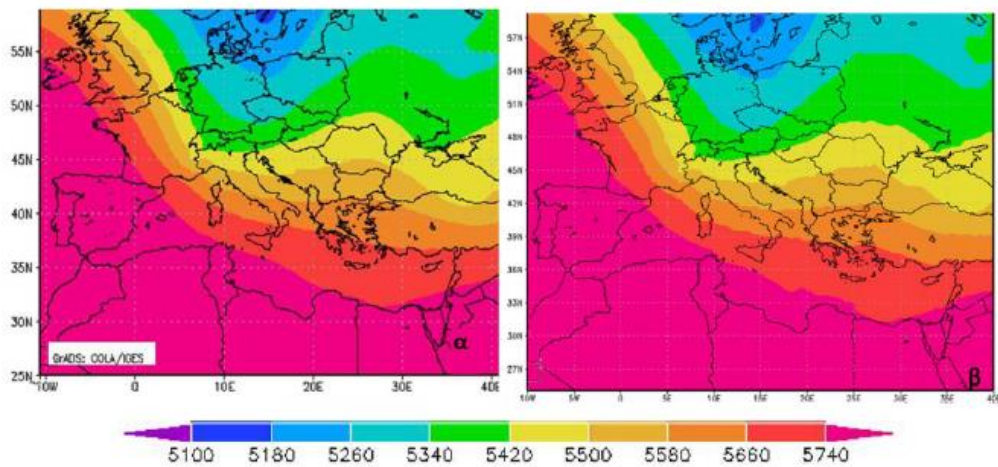
Σχήμα: 5.16 : Πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa) στις 12 UTC 10/11/07:α) από τις αναλύσεις του UKMO και β) από την προσομοίωση του WRF κατά την 24η προγνωστική ώρα Πηγή: Τσοπουρίδης, 2014



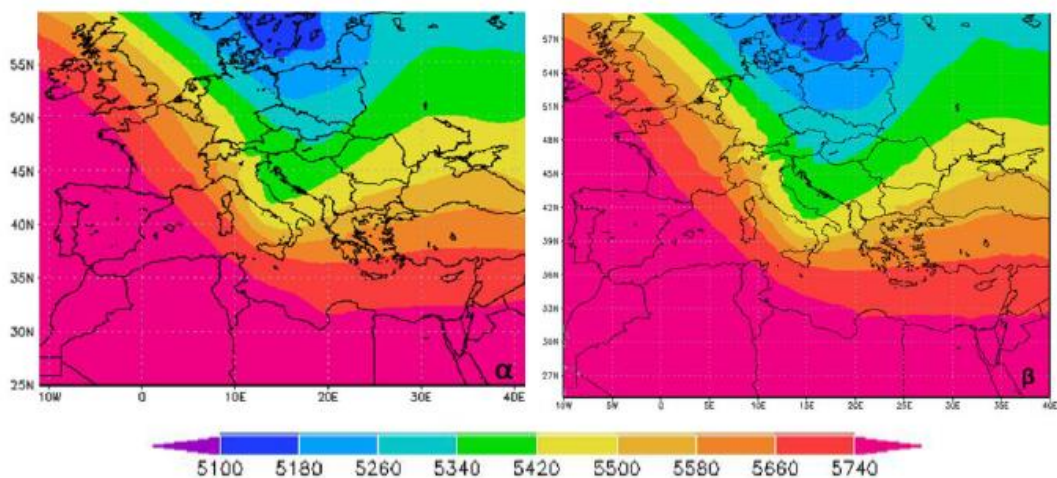
Σχήμα: 5.17: : Πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa) στις 00 UTC 11/11/07 από :α) τις αναλύσεις του UKMO και β) από την προσομοίωση του WRF κατά την 36η προγνωστική ώρα Πηγή: Τσοπουρίδης, 2014

Η συνοπτική κατάσταση στην Ευρώπη στις 09/11/07 στις 12 UTC είναι δυνατόν να χαρακτηριστεί από την ύπαρξη δύο κύριων συστημάτων, ενός αντικυκλώνα όπου το κέντρο είναι στα δυτικά της Μεγάλης Βρετανίας και ενός βαρομετρικού χαμηλού το οποίο βρίσκεται πάνω από την Σκανδιναβία. Τα μέτωπά του απλώνονται ως την Αδριατική θάλασσα με αποτέλεσμα να επηρεάζει τον καιρό της Ανατολικής Ευρώπης (σχήμα 5.14α). Η κίνηση του χαμηλού ανατολικότερα μετά από δώδεκα ώρες, (σχήμα 5.14α και 5.15α), έχει ως συνακόλουθο την μείωση της τιμής της ατμοσφαιρικής πίεσης στην επιφάνεια για την περιοχή της Ελλάδας. Έτσι, η πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας, στις 10/11/07 00 UTC, στην περιοχή της Θεσσαλονίκης είναι περίπου 1004 hPa (σχήμα 5.14α), δηλαδή κατά 12 hPa μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή στις 09/11/07 12 UTC (σχήμα 5.14α). Το κέντρο του βαρομετρικού χαμηλού στις 10/11/07 12 UTC, βρίσκεται πλέον στην περιοχή της Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης και η πίεση στην εκτεταμένη περιοχή της Θεσσαλονίκης είναι 1000 hPa (σχήμα 5.16α). Ωστόσο, λόγω της απομάκρυνσης του χαμηλού προς τα βορειοανατολικά, στις 11/11/07 00 UTC, στη Μαύρη Θάλασσα, αρχίζει η αύξηση της ατμοσφαιρικής πίεσης στην εκτεταμένη περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας (σχήμα 5.17α). Το ατμοσφαιρικό μοντέλο WRF, όπως παρουσιάζεται στα σχήματα 5.15, 5.16 και 5.17, προσδιόρισε σε πολύ καλό βαθμό τη θέση των διάφορων βαρομετρικών συστημάτων. Από σχήμα 5.15 είναι εμφανές ότι προσδιορίστηκε σχετικά με ακρίβεια η τοποθεσία των δύο χαμηλών βαρομετρικών στην περιοχή της Σκανδιναβία και στην Ανατολική Μακεδονία-Θράκη, όπως επίσης και στη Δυτική Ευρώπη το εκτεταμένο πεδίο υψηλών πιέσεων. Το μοντέλο προέβλεψε σε ικανοποιητικό βαθμό στις 10/11/07 12 UTC, τις μεταβολές στο πεδίο της πίεσης, τόσο στην περιοχή ενδιαφέροντος (Θεσσαλονίκη-1000 hPa - σχήματα 5.15α και 5.16β), όσο και στις υπόλοιπες περιοχές της Ευρώπης. Προσομοιώθηκε αρκετά καλά η κίνηση του χαμηλού με κατεύθυνση προς τα βορειοανατολικά, στις 11/11/07 00 UTC, αν και υπερεκτιμήθηκε αρκετά η βάθυνση της ύφεσης, με κέντρο στην Ουκρανία κατά 11 hPa (σχήματα 5.14-5.17). Επίσης και η αποδυνάμωση του αντικυκλώνα του Ανατολικού Ατλαντικού προς την Ιβηρική Χερσόνησο προσομοιώθηκε σε πολύ καλό βαθμό (το οποίο συμπεραίνεται από τη μείωση της βαρομετρικής πίεσης στο κέντρο του αντικυκλώνα και την πιο ανατολική θέση των ισοβαρών). Επομένως, προσομοιώθηκε σε πολύ καλό βαθμό η μεταβολή της πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας και κυρίως η βαροβαθμίδα, που αποτέλεσε την βασική αιτία για την εκδήλωση του έντονου επεισοδίου Βαρδάρης της 10ης Νοεμβρίου 2007, παρά τις όποιες μικροδιαφορές (μεγαλύτερη βάθυνση του χαμηλού και γρηγορότερη έλευσή του στην περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας-σχήμα 5.15).

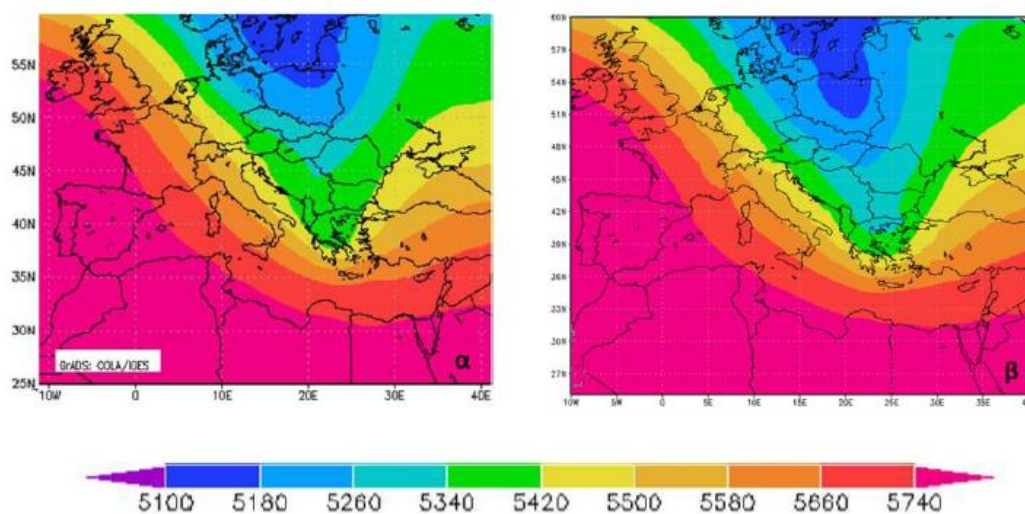
- ΠΕΔΙΟ ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΥΨΟΥΣ ΣΤΗΝ ΙΣΟΒΑΡΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΩΝ 500 mb



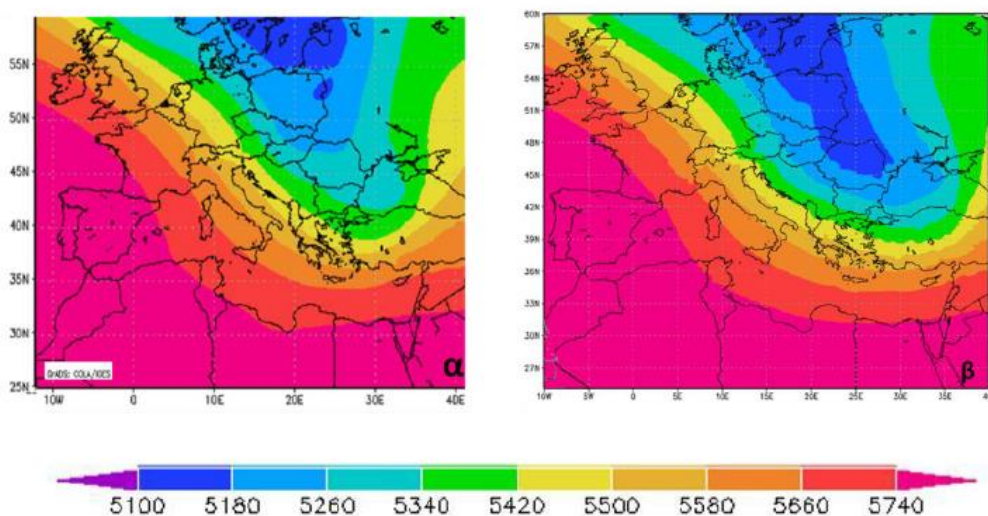
Σχήμα 5.18: γεωδυναμικό ύψος στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa (gpm) στις 09/11/07 12 UTC από: α) την επιχειρησιακή ανάλυση του ECMWF και β) από την προσομοίωση του WRF κατά την αρχικοποίησή του. Πηγή: Τσοπουρίδης, 2014



Σχήμα 5.19: γεωδυναμικό ύψος στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa (gpm) στις 00 UTC 10/11/07 από: α) την επιχειρησιακή ανάλυση του ECMWF και β) από την προσομοίωση του WRF κατά 12η ώρα της πρόγνωσης. Πηγή: Τσοπουρίδης, 2014



Σχήμα 5.20: γεωδυναμικό ύψος στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa (gpm) στις 12 UTC 10/11/07 από: α) την επιχειρησιακή ανάλυση του ECMWF και β) από την προσομοίωση του WRF κατά την 24η προγνωστική ώρα. Πηγή: Τσοπουρίδης, 2014



Σχήμα 5.21: γεωδυναμικό ύψος στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa (gpm) στις 00 UTC 11/11/07 από: α) την επιχειρησιακή ανάλυση του ECMWF και β) από την προσομοίωση του WRF κατά την 36η προγνωστική ώρα. Πηγή: Τσοπουρίδης, 2014

Τα παραπάνω σχήματα 5.19, 5.20 και 5.21 αφορούν την κατανομή των γεωδυναμικών υψών στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 mb, και διαπιστώνεται η πτώση των γεωδυναμικών υψών πάνω από τα Βαλκάνια από τις 09/11/07 12 UTC

(σχήμα 5.18α) έως τις 11/11/07 00 UTC (σχήμα 5.21α). Ιδιαίτερα, πάνω από την περιοχή Μακεδονία τα γεωδυναμικά ύψη ξεπερνούν τα 5580 grm στις 09/11/07 12 UTC (σχήμα 5.18α), ενώ μία ημέρα αργότερα δεν ξεπερνούν τα 5420 grm (σχήμα 5.20α). Ουσιαστικά, είναι ένας αυλώνας, ο άξονας του οποίου καταλαμβάνει τα νότια της Σκανδιναβίας μέχρι την Κεντρική Ελλάδα (σχήμα 5.20α). Το ατμοσφαιρικό μοντέλο WRF προσομοίωσε πολύ καλά τόσο τη θέση του αυλώνα, όσο και τη μεταγενέστερη κίνησή του (σχήματα 5.18-5.21). Η μόνη «αστοχία» που μπορεί να χρεωθεί στην πρόγνωση του μοντέλου, μπορεί να θεωρηθούν οι μεγαλύτερες τιμές γεωδυναμικού ύψους που παρατηρήθηκαν πάνω από τη Βόρεια Ελλάδα (σχήμα 5.20α), σε σχέση με αυτές που πρόβλεψε το μοντέλο (σχήμα 5.20β). Ωστόσο, αυτός ήταν και ο λόγος που υπερεκτιμήθηκε από το μοντέλο η βάθυνση του χαμηλού στην επιφάνεια στις 10/11/07 00 UTC (σχήμα 5.15β) (Τσοπουρίδης 2014).

Συμπεράσματα

Οι μέγιστες ταχύτητες ανέμου του επεισοδίου του ανέμου Βαρδάρη, που εμφανίσθηκε στις 10 Νοεμβρίου 2007 καταγράφηκαν κατά μήκος του Αξιού (20,5 m / s με ριπές έως 28.2 m / s) και στη νότια ακτή του Θερμαϊκού κόλπου (24 m / s, με ριπές έως 31,9 m / s). Το επεισόδιο σχετίζεται με το συνδυασμό ενός χαμηλού που επηρέασε όλη την Ελλάδα και ενός αντικυκλώνα στη Δυτική Ευρώπη. Ένας εκτεταμένος αντικυκλώνας στον Ανατολικό Ατλαντικό και τη Δυτική Ευρώπη σε συνδυασμό με μια βαθιά ύφεση που επηρέασε τη Βόρεια Ελλάδα πριν κινηθεί ανατολικά όπου είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία του φαινομένου Βαρδάρη. Δηλαδή, την ενίσχυση του βορειοδυτικού ρεύματος πάνω από την ευρύτερη περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας λόγω ισχυρής βαροβαθμίδας (1004 hPa ατμοσφαιρική πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας στα σύνορα Ελλάδας-Π.Γ.Δ.Μ. και στην περιοχή της Χαλκιδικής 996 hPa στις 12 UTC 10/11/07).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται την ανάπτυξη μεθοδολογιών για την πρόγνωση του καιρού με την χρήση των αριθμητικών μοντέλων πρόγνωσης καιρού όπου αποσκοπεί και στην ανίχνευση τυχόν σφαλμάτων της πρόγνωσης. Η επαλήθευση μπορεί να είναι ποιοτική ή ποσοτική. Η εργασία αυτή παρουσιάζει και περιγράφει μερικά επιχειρησιακά αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού όπως είναι WRF , WRF-NMM, ΠΟΔΕΙΔΩΝ, SKIRON.

Έπειτα παρατίθενται οι μέθοδοι αξιολόγησης των αριθμητικών μοντέλων πρόγνωσης καιρού όπου δημιουργήθηκε κατάλληλη μεθοδολογία στατιστικής ανάλυσης με την εφαρμογή πλήθους αποδεκτών στατιστικών ελέγχων. Το σύνολο αυτών των στατιστικών ελέγχων καλύπτει μετρήσεις της σχέσης ανάμεσα στα προγνωστικά πεδία και την πραγματική κατάσταση της ατμόσφαιρας. Με αυτή την διαδικασία, ερευνάται η συμπεριφορά της ποιότητας πρόγνωσης ολόκληρης της χρονικής περιόδου των προσομοιώσεων για την εξαγωγή των συμπερασμάτων σχετικά με την ύπαρξη συστηματικών σφαλμάτων, την ακρίβεια και την αξιοπιστία της πρόγνωσης. Η αξιολόγηση αυτή παρουσιάζει διαφοροποιήσεις ανάλογα με την εφαρμογή της είτε με στατικά μεγέθη συνεχών μετεωρολογικών μεταβλητών όπου, η ανάπτυξη μεθοδολογίας στατιστικής ανάλυσης έχει ως στόχο στην ανίχνευση τυχόν σφαλμάτων της πρόγνωσης, τα οποία ταξινομούνται σε συστηματικά, σε αριθμητικά και σε τυχαία σφάλματα, είτε με στατιστικά μεγέθη διακριτών μετεωρολογικών μεταβλητών όπου η συγκεκριμένη στατιστική ανάλυση αναφέρεται σε ρητές προγνώσεις τέτοιων μεταβλητών. Οι ρητές αυτές προγνώσεις δεν περιλαμβάνουν εκφράσεις αβεβαιότητας, όπως συμβαίνει σε στοχαστικές προγνώσεις αλλά βασίζεται στη δημιουργία πίνακα ενδεχομένων, διαστάσεων 2x2, που περιλαμβάνει το σύνολο των πιθανών συνδυασμών πρόγνωσης και παρατήρησης.

Τέλος, παρουσιάζεται η στατιστική αξιολόγηση σε Ελλάδα και Ευρώπη μέσω διάφορων ερευνών και μελετών που πραγματοποιήθηκαν, τόσο στον Ελλαδικό

χώρο όσο και στην Ευρώπη με τη χρήση των ευρέως χρησιμοποιούμενων αριθμητικών μοντέλων πρόγνωσης καιρού.

Επομένως, μπορούμε περιληπτικά να πούμε ότι η παρούσα διπλωματική μας παρέχει τις βασικές γνώσεις που πρέπει να έχει κάποιος για την κατανόηση ενός μοντέλου πρόβλεψης καιρού. Από την ανίχνευση και αντιμετώπιση τυχόν σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν στην πρόγνωσης μέχρι την επαλήθευση και την γνώση των κατάλληλων αλγορίθμων και μαθηματικών εξισώσεων για την ακριβή χρήση των αριθμητικών μοντέλων.

ΕΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Albers SC, 1995: The LAPS wind analysis. *Weather and Forecasting*, 10, 342–352.
- Angouridakis V, Balafoutis Ch, Maheras P (1981) ‘Les Vents de NW, et “Vardaris” a Thessalo-nique. Essai statistique. Eaux et Climats. Melanges offerts en homage a ChPEGUE. Grenoble
- Arseni-Papadimitriou A. and Macheras P., 1985: The influence of the wind Vardaris to the diurnal variation of the meteorological elements in the area of Thessaloniki , Thessaloniki 1985
- Atsushi Hashimoto, Hattori Y., 2008: Kadokura S., The forecasting system for wind power generation combined use of numerical and statistical models, Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan
- Beard K and Ochs H, 1993: Warm-Rain Initiation: An Overview of Microphysical Mechanisms. *Journal of Applied Meteorology*, 32, 608-625.
- Bjerknes, J., 1968: Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 97, pp.163-172.
- Ferrier BS, Jin Y, Lin Y, Black T, Rogers E, DiMego G (2002) Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta Model. In *Proc of 19th Conf. on Weather Analysis and Forecasting/15th Conf. on Numerical Weather Prediction*, San Anto-nio, TX, Amer. Meteor Soc 280-283.
- Hiemstra CA, Liston GE, Pielke RA, Birkenheuer DL and Albers SC, 2006: Comparing Local Analysis and Prediction System (LAPS) Assimilations with Independent Observations. *Weather and Forecasting*, 21, 1024–1040.
- Hohenegger C, Lüthi D and Schär C 2006: Predictability Mysteries in Cloud-Resolving Models. *Monthly Weather Review*, 134, 2095-2107.
- Hong SY, Lim KS, Kim JH, Lim JO, Dudhia J (2009) Sensitivity study of cloud-resolving con-vective simulations with WRF using two bulk microphysical parameterizations: Ice-phase microphysics versus sedimentation effects. *J Appl Meteor Climatol* 48:61-76. doi:10.1175/2008JAMC1960.1
- J. Charney, “The use of the primitive equations of motion in numerical prediction,” *Tellus*, vol. 7, pp. 22–26, 1955.
- J. Charney, R. Fjortoft, and J. von Neumann, “Numerical integration of the barotropic vorticity equation,” *Tellus*, vol. 2, pp. 237–254, 1950.
- Janjic, Z.I., J.P. Gerrity Jr., and S. Nickovic, 2001: An Alternative Approach to Nonhydrostatic Modeling. *Mon. Wea. Rev.*, 129, pp. 1164-1178.
- Jankov I, Schultz PJ, Anderson CJ, Koch SE (2007) The impact of different physical parameteri-zations and their interactions on cold season QPF in the American River Basin. *J Hydrome-teor* 8:1141-1151. doi:10.1175/JHM630.1
- Kallos, G., A. Papadopoulos, S. Nickovic, and P. Katsafados, 2006: “Trans-Atlantic North African dust transport: Model simulation”. *Journal of Geophysical Research*, 111, D09204, doi:10.1029/2005JD006207.

- 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, 1997b: The regional weather forecasting system Skiron: An overview. Proceedings of the Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments, 15-17 October 1997, Athens, Greece, 109-122.
- Katsafados P, 2003: Factors and parameterizations contributing the medium range forecast skill of limited area models. PhD Dissertation, Department of Physics, University of Athens (in Greek).
- Lin Y, Colle BA (2009) The 4–5 December 2001 IMPROVE-2 event: observed microphysics and comparisons with the Weather Research and Forecasting Model. *Mon Weather Rev* 137:1372-1392. doi:10.1175/2008MWR2653.1
- Lorenz EN, 1963: Deterministic non-periodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20, 130-141.
- Lorenz EN, 1965: A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. *Tellus*, 17, 321-333.
- Lorenz, E. N., 1965: A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. *Tellus*, 17, pp. 321-333
- Maheras P, Flocas A, Karacostas Th (1984) La structure de la basse troposphere pendant le vent Vardaris a Thessalonique , *Zbornik* 10, pp 241-243.
- Manuals prepared for the SKIRON system at the framework of the project EPET-II “An integrated forecasting system on parallel computer platforms”.
- Mazarakis N, Kotroni V, Lagouvardos K, Argiriou AA (2009) The sensitivity of numerical fore-casts to convective parameterization during the warm period and the use of lightning data. *Atm Res* 94:704-714. doi:10.1016/j.atmosres.2009.03.002
- Nickovic, S., G. Kallos, A. Papadopoulos and O. Kakaliagou, 2001: A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere. *J. Geoph. Res.*, 106, pp.18113-18129.
- Papadopoulos A, Katsafados P, Kallos G and Nickovic S, 2002: The Poseidon weather forecasting system: An overview. *The Global Atmosphere and Ocean Systems*, 8, 219-237
- Papadopoulos, A., P. Katsafados, E. Mavromatidis, and G. Kallos, 2008. Assessing the skill of the POSEIDON-II weather forecasting system. Abstracts books of the EuroGOOS 2008 conference
- Philips, N.A., 1957: A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting. *J. Meteorol.*, 14, pp.184-185.
- Pielke R. (2002), *Mesoscale Meteorological Modeling*, 2nd Edition, Academic Press, Colorado.

- Psarri L (2005) The local wind of Thessaloniki, Vardaris - An approach to the problem with classical methods and the use of Artificial Neural Networks, MSc Thesis, AUTH.
- Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Wang W, Powers JG (2008) A description of the advanced WRF version 3 NCAR Tech Notes.
- Wallace J.M. and Hobbs P.V., 1977: Atmospheric Science. An Introductory Survey, Academic Press. , New York, 467pp.
- Wang W, Bruyère C, Duda M, Dudhia J, Gill D, Lin H-C, Michalakes J, Rizvi S, Zhang X (2010) ARW Version 3 Modeling System User's Guide. NCAR-MMM. pp. 312.
- Wilks, D.S., 1995: Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, Academic Press NY, pp 233-277.
- Zhang F, Zhang F, Snyder C and Rotunno R, 2002: Mesoscale Predictability of the "Sunrise" Snowstorm of 24-25 January 2000. Monthly Weather Review, 130, 1617-1632

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Π. Κατσαφάδος, Η. Μαυροματίδης, Α. Παπαδόπουλος και Γ.Κάλλος, 2008 «Η εφαρμογή συστήματος αφομοίωσης δεδομένων και η επίδραση του στην προγνωστική ικανότητα ενός ατμοσφαιρικού μοντέλου περιορισμένης περιοχής» Πρακτικά 9^ο συνεδρίου, Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και φυσικής Ατμόσφαιρας, 28-31 Μαΐου, Θεσσαλονίκη.
- Γκίκας Α. 2004 «Ατμοσφαιρικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού», Πτυχιακή εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης.
- Ε. Αυγουστόγλου, Θ. Ανδεάδης, Π. Φραγκούλης., Φ. Γκόφα, Π. Λουκά, Ι.Παπαγεωργίου,Ι. Πυθαρούλης, ΚΑΙ Β. Τύρφη, 2008 «Ποσοτική εκτίμηση υετού του τοπικού μοντέλου αριθμητικής πρόγνωσης COSMO.GR» Πρακτικά 9^ο συνεδρίου, Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και φυσικής Ατμόσφαιρας, 28-31 Μαΐου, Θεσσαλονίκη.
- Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, 2014, Διαδίκτυο (<http://www.hnms.gr>) «Αριθμητικά Μοντέλα Πρόγνωσης Καιρού»
- Ευσταθίου Γ, Μελάς Δ, Ζουμάκης Ν, Κασσομένος Π, 2012 , «Αξιολόγηση του μοντέλου WRF - ARW σε περίπτωση έντονων βροχοπτώσεων στην Χαλκιδική», Πρακτικά 11ο Συνεδρίου Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και φυσικής Ατμόσφαιρας, Μάιος, Αθήνα.
- Κατσαφάδος Π. 2007 : Αρχές μετεωρολογίας και κλιματολογίας, Χαροκόπειο πανεπιστήμιο, Αθήνα, 14-17.
- Μακρογιάννης Τ., Σαχσαμάνογλου Χ., 2004: Μαθήματα γενικής μετεωρολογίας, Εκδόσεις Χάρης , Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- Μαχαίρας Π., 1982: Συνοπτικές Καταστάσεις και Πολυδιάστατη ανάλυση του καιρού στη Θεσσαλονίκη. Μονογραφία, Δημοσίευση αριθμός 15, Εργαστήριο Κλιματολογίας Πανεπιστημίου Αθηνών, σελ.185 Μεταπτυχιακή διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- Π. Κατσαφάδος, Η. Μαυροματίδης, Α. Παπαδόπουλος και Γ.Κάλλος
- Πυθαρούλης Ι. ,και Παπαγεωργίου Ι., «Περιγραφή των προϊόντων του ντετερμινιστικού μοντέλου και του συστήματος στοχαστικών προγνώσεων του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού» Τεχνική Έκθεση, Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία 2006

- ΤΟΓΕΛΟΥ Α, 2010, Διπλωματική εργασία «Πρόβλεψη αιολικής παραγωγής με τη χρήση αναδρομικών νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης», Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο.
- Τσοπουρίδης Λ. , Πυθαρούλης Ι. , Καρακώστας Τ., Ζάνης Π., Τεγούλιας Ι., 2012 «Αριθμητική μελέτη έντονου επεισοδίου Βαρδάρης άνεμος» Πρακτικά 11ο Συνεδρίου, Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και φυσικής Ατμόσφαιρας, Μάιος, Αθήνα.
- Τσοπουρίδης Λ. 2014, «Αριθμητική μελέτη έντονου επεισοδίου Βαρδάρη» Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

<http://www.met.tamu.edu>

<http://www.cosmo-model.org>

<http://www.shodor.org>

<http://meted.ucar.edu>

<http://www.ecmwf.int>

<http://forecast.uoa.gr>

<http://www.hnms.gr>

<http://www.poseidon.ncmr.gr>

<http://forecast.uoa.gr>

<http://www.hcmr.gr>

<http://mathsci.ucd.ie/~plynch/Talks/NWP50-P4.pdf>