

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Ρευστών

Εργαστήριο Καινοτόμων Τεχνολογιών Προστασίας Περιβάλλοντος

Συμβολή στην αριθμητική πρόγνωση καιρού και
μέτρηση μετεωρολογικών παραμέτρων γύρω από το
κτίριο ΑΝΥΜ, ΕΜΠ

Διπλωματική Εργασία

του

Ευάγγελου Σ. Κουναλάκη

Επιβλέποντες: Δημήτριος Μπούρης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2016

Ευχαριστίες

Νιώθω την ανάγκη να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου απέναντι στους ανθρώπους εκείνους που με βοήθησαν στην συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Δημήτριο Μπούρη, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και επίκαιρο θέμα, και από την πρώτη κιόλας στιγμή με παρότρυνε προς την εκπόνηση του. Τον ευχαριστώ θερμά για την καθοδήγηση και την καίρια βοήθειά που μου προσέφερε όποτε υπήρχε ανάγκη.

Θα ήθελα ωστόσο να ευχαριστήσω τους φίλους, την οικογένεια μου, καθώς και εκείνους τους ανθρώπους που όλο αυτό το διάστημα των σπουδών ήταν κοντά μου και με ενθάρρυναν με τις συμβουλές και τις απόψεις τους.

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Ρευστών
Εργαστήριο Καινοτόμων Τεχνολογιών Προστασίας Περιβάλλοντος

**Συμβολή στην αριθμητική πρόγνωση καιρού και μέτρηση μετεωρολογικών
παραμέτρων γύρω από το κτίριο ΑΝΥΜ, ΕΜΠ**

Κουναλάκης Σ. Ευάγγελος

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπούρης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2016

Περίληψη

Το WRF είναι ένα αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού της μεσοκλίμακας με πολλές ερευνητικές και επιχειρησιακές εκδόσεις. Χρησιμοποιείται παγκοσμίως για πρόγνωση καιρού από ερευνητικούς οργανισμούς και πανεπιστήμια, ενώ παράλληλα μπορεί να συνδεθεί με λογισμικά για εφαρμογές διασποράς ρύπων κ.α. Στην διπλωματική εργασία, γίνεται μια σειρά συγκρίσεων που έχει ως στόχο την μελλοντική χρήση του WRF με εμπιστοσύνη στα αποτελέσματά του. Αρχικά γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του λογισμικού με μετρήσεις που έγιναν με τα μετεωρολογικά όργανα SODAR (ραντάρ με υπερήχους) και MTP5 (ανίχνευση μικροκυμάτων), από μια προηγούμενη έρευνα στην περιοχή του πανεπιστημίου της Κοζάνης και επιμέρους σύγκριση με το αριθμητικό μοντέλο TAPM που χρησιμοποιήθηκε εκεί. Έπειτα γίνεται η επέκταση της υπάρχουσας εγκατάστασης του λογισμικού σε μια πρώτη προσέγγιση της εφαρμογής πρότυπου αστικού θόλου για την περιοχή της Αθήνας, συμπεριλαμβάνοντας έτσι και τις ανθρωπογενείς επιδράσεις στο μικροκλίμα (π.χ. θερμικές νησίδες, επιδράσεις από κτίρια, οροφές και τοίχους, αεροδυναμικά χαρακτηριστικά κτιρίων κ.α.). Μέσω της σύγκρισης με πειραματικά δεδομένα από μετεωρολογικό ιστό που εγκαταστάθηκε στην Πολυτεχνειούπολη διαπιστώνεται η ικανότητα και η ακρίβεια πρόγνωσης της μικροκλίμακας από μέσης κλίμακας μοντέλο πρόγνωσης καιρού. Η εγκατάσταση και η εφαρμογή του λογισμικού είναι σε περιβάλλον Linux, ενώ η ανάγκη πρόγνωσης καιρού σε πραγματικό χρόνο μας οδήγησε στην ανάπτυξη αυτοματοποιημένης διαδικασίας μέσω αλγορίθμου κλήσης εντολών λειτουργικού συστήματος, που λειτουργεί επιχειρησιακά πραγματοποιώντας τις απαραίτητες καιρικές προγνώσεις.

National Technical University of Athens
School Of Mechanical Engineering
Fluids Department
Laboratory for Innovative Environmental Technologies

Contribution to numerical weather forecasting and measurement of meteorological parameters around ANYM building, NTUA

Kounalakis S. Evangelos

Advisor: Demetri Bouris, Assistant Professor NTUA

Athens, June 2016

Abstract

WRF is a mesoscale numerical weather forecasting model that has many research and operational versions. Used worldwide for weather forecast by many other research organizations and universities, it can also be connected with complementing software for pollutant dispersion applications etc. In this thesis, a series of comparisons is made, which aims to the future use of WRF, with confidence in its results. Firstly we compare the software results with measurements made by the meteorological instruments SODAR (ultrasonic radar) and MTP5 (microwave detection) from a previous research in the area of Kozani university and additional comparison with the numerical model TAPM used there. Up next is the extension of the existing installation of the software in a first approximation of the urban canopy application in the area of Athens, thereby including anthropogenic effects on the microclimate (eg heat islands, effects from ceilings, walls and buildings, aerodynamic characteristics etc.). Through the installation of a meteorological weather station in the NTUA campus, comparison with experimental data permits us to ascertain the ability and reliability of predicting the microscale meteorological parameters via mesoscale numerical weather forecasting. The installation and implementation of software is under Linux environment, while the need for real time weather forecasting led us to the development of an automated script that functions operationally, accomplishing the necessary weather forecasts.

Περιεχόμενα

Πίνακας περιεχομένων

Περιεχόμενα	i
Πρόλογος.....	iii
Κεφάλαιο 1 . Εισαγωγή	1
1.1 Λεξικό μετεωρολογικών εννοιών	1
1.2 Στοιχεία από την βιβλιογραφία σχετικά με την αριθμητική πρόγνωση του καιρού	10
Κεφάλαιο 2 . Μέτρηση Μετεωρολογικών Μεγεθών	16
2.1 Μετεωρολογικοί σταθμοί και χρήση τους.....	16
2.2 Πειραματικοί σταθμοί ερασιτεχνικής χρήσης	17
2.3 Εγκατάσταση του μετεωρολογικού σταθμού Davis Instruments.....	18
2.4 Τα μετεωρολογικά όργανα SODAR και MTP5	27
Κεφάλαιο 3 . Αριθμητική Πρόγνωση Καιρού	30
3.1 Αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού.....	30
3.2 Λογισμικό WRF και οι συνιστώσες του.....	33
3.2.1 Εισαγωγή.....	33
3.2.2 Κύρια χαρακτηριστικά του ARW συστήματος	34
3.2.3 Ισχύουσες Εξισώσεις	36
3.2.4 Χρονική και Χωρική διακριτοποίηση	41
3.2.5 Αρχικές Συνθήκες	44
3.2.6 Χρήση υποπλεγμάτων	49
3.2.7 Μοντέλα Φυσικής	56
Κεφάλαιο 4 . Εφαρμογή Αριθμητικής Μεθοδολογίας.....	63
4.1 Τρεξίματα που έγιναν, με ποιον σκοπό, πως οδηγηθήκαμε.....	63
Setup_1	64
Setup_2	66
Setup_3	72

4.2 Επιπλέον βοηθητικά λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν	74
NCL.....	74
GNUPLOT.....	74
Bash Script.....	75
Κεφάλαιο 5 . Αποτελέσματα.....	77
5.1 Περίπτωση Αθήνας (Setup_1) 5-10-2015.....	77
5.2 Περίπτωση Κοζάνης (Setup_2) 9-8-2014	84
5.3 Περίπτωση Κοζάνης (Setup_2) 9-2-2014	91
5.4 WRF και TAPM.....	98
5.5 WRF και Davis Instruments - Περιπτώσεις Αθήνας (Setup_3).....	108
Κεφάλαιο 6 . Συμπεράσματα	117
Κεφάλαιο 7 . Προτάσεις Για Μελλοντικές Εργασίες	121
7.1.1 Ενεργοποίηση άλλων παραμέτρων (μοντέλα φυσικής, δυναμικής).....	121
7.1.2 Στήσιμο αλυσίδας μοντέλων για πρόγνωση καιρού και ρύπανσης.....	121
Βιβλιογραφία	124
Παράρτημα Α	130

Πρόλογος

Η ανησυχία του ανθρώπου να εξηγήσει τα φαινόμενα που συνέβαιναν στην καθημερινή του ζωή και λαμβάνουν χώρα στο κατώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας την τροπόσφαιρα, ως τροπές ή μεταβολές, οδήγησε ήδη από την αρχαιότητα στην εύρεση εκείνων των μεθόδων που θα τον διευκόλυναν στην επεξήγηση των μεταβολών αυτών, δηλαδή στην μελλοντική πρόγνωση του καιρού. Αρκούνταν σε παρατηρήσεις όπως ήταν η κατάσταση της θάλασσας, το σχήμα και το χρώμα των νεφών, η ηλιοφάνεια, ακόμη και οι κινήσεις των πτηνών ή οι θέσεις των αστεριών στον έναστρο ουρανό. Οι παρατηρήσεις αυτές θα τον βοηθήσουν να ολοκληρώσει με επιτυχία ένα μακρινό ταξίδι στην θάλασσα και θα τον διευκολύνουν στις κυριότερες ασχολίες του, την γεωργία, την κτηνοτροφία και την εμπορική ναυτιλία.

Πλέον γίνεται αριθμητική πρόγνωση του καιρού, με χρήση εξελιγμένων οργάνων ή μαθηματικών μοντέλων της ατμόσφαιρας και των ωκεανών, βασισμένη στις υπάρχουσες καιρικές συνθήκες. Τα μαθηματικά μοντέλα αυτά βασίζονται στους ίδιους τους νόμους της φυσικής και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία βραχυπρόθεσμων προγνώσεων καιρού ή μακροπρόθεσμων προγνώσεων του κλίματος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ατμόσφαιρα είναι ένα ρευστό, η αριθμητική πρόγνωση του καιρού, είναι επί της ουσίας η εκτίμηση της κατάστασης του ρευστού από μια δεδομένη χρονική στιγμή σε κάποια άλλη χρονική στιγμή στο μέλλον, υπό την χρήση κατάλληλων εξισώσεων ρευστομηχανικής και θερμοδυναμικής.

Με την εγκατάσταση του αριθμητικού μεσοκλιματικού πρότυπου πρόγνωσης καιρού WRF, είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε αυτήν την μελλοντική κατάσταση της ατμόσφαιρας και να συγκρίνουμε τις προσομοιώσεις με αποτελέσματα από πειραματικά δεδομένα και αντίστοιχα λογισμικά. Η δυνατότητα καθημερινών προγνώσεων δίνει αποτελέσματα, τα οποία μελλοντικά θα αποτελέσουν δεδομένα εισόδου σε λογισμικά πρόγνωσης αέριας ρύπανσης και έκθεσης του ανθρώπινου πληθυσμού.

Η διάρθρωση της εργασίας

Στο **1^ο κεφάλαιο** γίνεται αναφορά σε μετεωρολογικές παραμέτρους που ένας μηχανικός θα πρέπει να έχει υπόψη του όταν μελετά ένα μετεωρολογικό πρόβλημα. Αναφέρονται ενδιαφέρουσες περιπτώσεις από μελέτες άλλων μηχανικών και πανεπιστημίων στο κομμάτι της αριθμητικής πρόγνωσης του καιρού με χρήση του WRF και άλλων λογισμικών.

Στο **2^ο κεφάλαιο** αναλύονται διάφοροι τύποι πειραματικών σταθμών. Δίνεται έμφαση σε μετεωρολογικούς πειραματικούς σταθμούς ερασιτεχνικής χρήσης και αναλύονται οι συνιστώσες του εγκατεστημένου πειραματικού σταθμού Davis Instruments.

Στο **3^ο κεφάλαιο** γίνεται αναφορά σε διάφορα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού και εν συνεχεία ανάλυση του αριθμητικού μοντέλου πρόγνωσης καιρού WRF, με επεξήγηση των συνιστωσών και διαφορών παραμέτρων αυτού.

Στο **4^ο κεφάλαιο** αναφέρονται όλα τρεξίματα που πραγματοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας με τα αντίστοιχα Setups για τις περιοχές της Κοζάνης και της Αθήνας. Αναλύονται τα επιπλέον βοηθητικά προγράμματα (NCL, GNU PLOT, Bash Script) που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία των αποτελεσμάτων και την αυτοματοποίηση της διαδικασίας των προγνώσεων.

Στο **5^ο κεφάλαιο** παρατίθενται τα αποτελέσματα των WRF προσομοιώσεων με τα αντίστοιχα διαγράμματα τους και τις συγκρίσεις από διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις, καθώς και τις συγκρίσεις με το TAPM, αντίστοιχο μεσοκλιματικό λογισμικό.

Στο **6^ο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και μια σύνοψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο **7^ο κεφάλαιο** παρουσιάζονται ορισμένες προτάσεις για μελλοντικές διπλωματικές εργασίες

Κεφάλαιο 1 . Εισαγωγή

1.1 Λεξικό μετεωρολογικών εννοιών

Γεωδυναμικό

Η βαρύτητα ορίζεται ως το αποτέλεσμα της βαρυτικής έλξης. Το γεωδυναμικό αντιπροσωπεύει την δυνατότητα που έχει το βαρυτικό πεδίο της Γης. Συνήθως το σχηματίζουμε για ευκολία ως μείον το δυναμικό ενέργειας ανά μονάδα μάζας, έτσι ώστε το διάνυσμα βαρύτητας (που είναι η κλίση αυτού του δυναμικού), να λαμβάνεται χωρίς το αρνητικό πρόσημο. Η παγκόσμια μέση επιφάνεια της Γης βρίσκεται κοντά σε μια από τις ισοδυναμικές επιφάνειες του γεωδυναμικού βαρύτητας W . Αυτή η ισοδυναμική επιφάνεια ή επιφάνεια σταθερού γεωδυναμικού ονομάζεται γεωειδές και συμβολίζεται με W_0 . Έτσι το γεωδυναμικό λαμβάνεται ως $C = -(W - W_0)$.

Τα αριθμητικά μοντέλα όπως και το WRF, παράγουν τις μεταβλητές κατάστασης οι οποίες χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις πρόγνωσης. Κάποιες από τις μεταβλητές αυτές είναι τα λεγόμενα πεδία διαταραχής. Στην διπλωματική εργασία ορίζονται τα παρακάτω απαραίτητα πεδία:

το συνολικό γεωδυναμικό (total geopotential): $Ph + Phb$ και

το συνολικό γεωδυναμικό ύψος (total geopotential height) σε m ως: $\frac{Ph+Phb}{9.81}$

Η μεταβλητή Ph ονομάζεται διαταραχή γεωδυναμικού (perturbation geopotential) και μετριέται σε $\frac{m^2}{s^2}$.

Η μεταβλητή Phb ονομάζεται διαταραχή γεωδυναμικού βάσης ή εδάφους (base state geopotential) και μετριέται σε $\frac{m^2}{s^2}$.

Το συνολικό γεωδυναμικό ύψος ανηγμένο σε m , είναι αυτό που καθορίζει τα επίπεδα πίεσης στην ατμόσφαιρα και υπολογίζεται από ένα αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού.

Δυναμική Θερμοκρασία

Με τον όρο δυναμική θερμοκρασία, για μια πολύ μικρή ποσότητα ρευστού, αναφερόμαστε στην θερμοκρασία εκείνη που θα αποκτούσε το ρευστό, αν το πηγαίναμε αδιαβατικά σε μια πίεση αναφοράς, συνήθως 1000 *millibars*. Υποδηλώνεται με το γράμμα θ και για τον αέρα δίνεται από την εξίσωση

$$\theta = T \left\{ \frac{P_0}{P} \right\}^{\frac{R}{C_p}} \quad (1.1)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία σε Kelvin της ποσότητας του ρευστού, P_0 είναι η πίεση αναφοράς, R είναι η σταθερά του αερίου, C_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα σε μια σταθερή πίεση P . Για τον ατμοσφαιρικό αέρα είναι συνήθως $\frac{R}{C_p} = 0,286$.

Η δυναμική θερμοκρασία για την μετεωρολογία, είναι το ίδιο σημαντική με την πραγματική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν επηρεάζεται από την φυσική ανύψωση ή βύθιση που σχετίζεται με την ροή γύρω από εμπόδια, ή από μεγάλης κλίμακας αναταράξεις. Για παράδειγμα μια ποσότητα ρευστού εκτονώνεται και παγώνει καθώς ανεβαίνει μια πλαγιά, ενώ συμπιέζεται και θερμαίνεται καθώς την κατεβαίνει στην άλλη πλευρά. Αυτό δεν συμβαίνει με την δυναμική θερμοκρασία, η οποία δεν επηρεάζεται από τις απώλειες θερμότητας, ή την εξάτμιση, ή συμπύκνωση, θέρμανση κλπ.

Η πραγματική θερμοκρασία όπως είναι γνωστό αυξομειώνεται συναρτήσει του ύψους της ατμόσφαιρας. Σε περιπτώσεις όπου επικρατεί ευστάθεια, για την δυναμική θερμοκρασία θα ισχύει $\frac{\partial \theta}{\partial z} > 0$. Σε αντίθετη περίπτωση όπου παρατηρηθεί $\frac{\partial \theta}{\partial z} < 0$, με το ύψος της ατμόσφαιρας, αυτό σημαίνει αστάθεια σε κατακόρυφες κινήσεις, αστάθεια στον κορεσμένο αέρα και πιθανή συναγωγή. Η συναγωγή αναμειγνύει γρήγορα την ατμόσφαιρα και επιστρέφει γρήγορα σε ευστάθεια. Ένα αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού όπως είναι το WRF, εκτός από την πραγματική θερμοκρασία υπολογίζει και την δυναμική θερμοκρασία.

Θερμοκρασιακή ή Θερμική Αναστροφή

Σε κανονικές συνθήκες, η θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος ελαττώνεται όσο απομακρύνεται κανείς από την επιφάνεια της Γης μέσα στην τροπόσφαιρα, με ρυθμό μείωσης $-6,5 \frac{K}{km}$. Υπάρχουν περιπτώσεις όμως όπου η θερμοκρασία του αέρα αυξάνεται τοπικά με το ύψος αντί να μειώνεται, κάτι το οποίο ονομάζεται θερμοκρασιακή αναστροφή.

Κατά την διάρκεια της ημέρας κοντά στο έδαφος αναπτύσσεται ένα ασταθές οριακό στρώμα βάθους $500 - 2000m$, πάνω από το οποίο υπάρχει ένα άλλο ευσταθές (Μπεργελές Γ., 2006). Οι θερμότερες μάζες αυτού του στρώματος έχοντας μικρότερη πυκνότητα, έχουν την τάση να κινούνται προς μεγαλύτερα υψόμετρα, όπου και θα αντικατασταθούν από ψυχρότερες και βαρύτερες μάζες, όπως επιβάλλει η φυσική κυκλοφορία. Όταν όμως σε κάποιο σημείο χαμηλά στην ατμόσφαιρα επικρατούν αέριες μάζες ψυχρότερες από αυτές που βρίσκονται σε υψηλότερο στρώμα, τότε οι ψυχρότερες παραμένουν ακίνητες και οδηγούμαστε σε μια σταθεροποιημένη κατάσταση που αποκλίνει από την κανονική. Η κατάσταση αυτή καλείται ανυψωμένη θερμοκρασιακή αναστροφή. Στα πιο πάνω στρώματα ο αέρας ψύχεται κανονικά αυξανόμενου του υψομέτρου.

Αν για παράδειγμα έχουμε ένα πλούμιο καυσαερίου από καπνοδόχο ανερχόμενο μέσα στο ασταθές ημερήσιο ατμοσφαιρικό στρώμα, είναι πολύ πιθανό να συναντήσει την ανυψωμένη θερμοκρασιακή αναστροφή. Η δυναμική θερμοκρασία της καπνοδόχου μένει σταθερή $\frac{\partial \theta_{καπνού}}{\partial z} = const$. Σε κάποιο σημείο όμως στην ατμόσφαιρα θα είναι

$$\frac{\partial \theta_{καπνού}}{\partial z} = \frac{\partial \theta_{p.t.}}{\partial z} \quad (1.2)$$

και τα δυο αυτά μεγέθη εξισώνονται. Αν το πλούμιο έχει επαρκή ροή άνωσης θα εισχωρήσει μέσα στην αναστροφή, με αποτέλεσμα μηδενικές ρυπαντικές συγκεντρώσεις στο έδαφος. Πρόκειται για ευσταθή κατάσταση ατμόσφαιρας, όπου το πλούμιο οριζοντιώνεται στον ουρανό πάνω από την βάση της αναστροφής. Αντίθετα, αν το πλούμιο δεν έχει επαρκή ροή άνωσης, τότε θα εγκλωβιστεί κάτω από την βάση της θερμοκρασιακής αναστροφής, μέσα στο ασταθές στρώμα εδάφους, δημιουργώντας υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης ρυπαντικών ουσιών.

Υγρασία

Ο όρος υγρασία αναφέρεται στους υδρατμούς που περιέχονται στον ατμοσφαιρικό αέρα και προέρχονται από την εξάτμιση υγρών επιφανειών, συνήθως θαλασσών. Η απόλυτη υγρασία (humidity), είναι το μέγεθος που εκφράζει πόσα γραμμάρια υδρατμών βρίσκονται σε ένα κυβικό μέτρο αέρα. Η σχετική υγρασία (relative humidity), είναι ο λόγος της μάζας των υδρατμών που βρίσκονται σε έναν ορισμένο όγκο αέρα, προς την μάζα των υδρατμών που θα υπήρχαν στον ίδιο όγκο αέρα, αν ο αέρας ήταν κεκορεσμένος. Κεκορεσμένη ατμόσφαιρα σημαίνει ότι όσο περισσότεροι υδρατμοί βρίσκονται στον αέρα, τόσο πιο δύσκολη γίνεται η εξάτμιση του νερού. Όταν αυξάνεται η ποσότητα των υδρατμών στον αέρα, λέμε ότι αυξάνεται η υγρασία. Στον κεκορεσμένο αέρα η υγρασία έχει φτάσει στο 100%. Ο τελείως ξηρός αέρας έχει 0% σχετική υγρασία. Για δεδομένη θερμοκρασία υπάρχει όριο στο οποίο ο αέρας γίνεται κεκορεσμένος.

Η εξίσωση

$$es(T) = 6,1094 * e^{\frac{17,625T}{T+243,04}} \quad (1.3)$$

είναι γνωστή ως τύπος των Magnus-Tetens, όπου $es(T)$ είναι η μέγιστη τάση υδρατμών ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, στην ουσία δείχνει για κάθε θερμοκρασία την ποσότητα υδρατμών που μπορεί να συγκρατήσει η ατμόσφαιρα. Στην ομίχλη παρατηρείται σχεδόν πάντα κεκορεσμένη κατάσταση σχετικής υγρασίας 100%. Τα παραπάνω μεγέθη της υγρασίας είναι από τα βασικότερα μεγέθη που εκτιμά ένας πειραματικός μετεωρολογικός σταθμός.

Αίσθηση ψύχους

Αίσθηση ψύχους (wind chill), είναι η πραγματική θερμοκρασία που αισθάνεται ο ανθρώπινος οργανισμός, υπό την επίδραση χαμηλών θερμοκρασιών και παρουσία ανέμου. Είναι πάντοτε μικρότερη από την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Όταν έξω στο περιβάλλον επικρατεί για παράδειγμα θερμοκρασία $4^{\circ}C$ και άπνοια, νηνεμία, τότε η αίσθηση ψύχους είναι και αυτή $4^{\circ}C$. Αν όμως πνέει άνεμος $10km/h$, τότε η αίσθηση ψύχους είναι $0^{\circ}C$. Με άνεμο $40km/h$, η αίσθηση φτάνει στους $-11^{\circ}C$. Το

μέγεθος αυτό της αίσθησης ψύχους υπολογίζεται από τους περισσότερους πειραματικούς σταθμούς.

Δείκτης δυσφορίας

Ο δείκτης δυσφορίας (heat index) δείχνει πόση ζέστη αισθάνεται ο ανθρώπινος οργανισμός πραγματικά, σε συνδυασμό με την τρέχουσα θερμοκρασία και υγρασία. Εκφράζει δηλαδή το βαθμό δυσφορίας του ανθρώπου, λόγω επιδράσεων των θερμουδρομετρικών συνθηκών. Πιο συγκεκριμένα αναφέρεται στην πραγματική θερμοκρασία που αισθανόμαστε όταν επικρατεί αυξημένη σχετική υγρασία και πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Όταν για παράδειγμα η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 36°C , και η σχετική υγρασία σε ποσοστό 30%, τότε ο δείκτης δυσφορίας είναι και αυτός 36°C . Όταν σε θερμοκρασία 36°C επικρατεί υγρασία 50%, τότε ο δείκτης δυσφορίας είναι 43°C , ενώ με 80% φτάνει στους 61°C . Το μέγεθος αυτό επίσης μετράται και καταγράφεται από έναν σύγχρονο μετεωρολογικό σταθμό.

Σημείο Δρόσου

Σημείο δρόσου (dew point), είναι το φαινόμενο κατά το οποίο οι υδρατμοί που βρίσκονται κοντά στο έδαφος συμπυκνώνονται σε μεγάλες σταγόνες νερού και με αυτόν τον τρόπο καλύπτουν ένα αντικείμενο. Στο σημείο αυτό αυξάνεται ο ρυθμός συμπύκνωσης του νερού, ενώ μειώνεται ο ρυθμός εξάτμισής του. Λέγεται αλλιώς και σημείο υγροποίησης ή κόρου ατμόσφαιρας. Εννοείται πως στο σημείο αυτό ο αέρας είναι κεκορεσμένος και δεν μπορεί να συγκρατήσει άλλους υδρατμούς. Θερμοκρασία δρόσου μπορεί να είναι οποιαδήποτε θερμοκρασία πάνω από τους 0°C . Αν η θερμοκρασία συμπύκνωσης των υδρατμών είναι κάτω από 0°C , τότε δημιουργείται πάχνη ή παγετός.

Άνεμος

Άνεμος καλείται η κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα σε σχέση με το έδαφος. Κυρίως είναι οριζόντιος αλλά υπάρχουν και τα ανοδικά και καθοδικά ρεύματα. Ως γνωστόν λόγω της απόστασης και κλίσης της Γης, η ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει περισσότερο τον Ισημερινό. Ο θερμός αέρας του Ισημερινού ανεβαίνει προς τα πάνω ως ελαφρύτερος, αφήνοντας πίσω ένα κενό χαμηλής πίεσης. Το κενό αυτό έρχεται να καλύψει ψυχρός αέρας είτε από τα βόρεια είτε από τα νοτιότερα τμήματα του Ισημερινού, δίνοντας βροχές στην τροπική ζώνη, αποτέλεσμα της ψύξης του θερμού υγρού αέρα που ανέρχεται. Έπειτα ο ψυχρός αέρας αυτός θερμαίνεται στα κατώτερα στρώματα και κατευθύνεται είτε νότια είτε βόρεια. Ο αέρας που θα βρεθεί στα υψηλότερα στρώματα όμως που επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες ψύχεται και άρα αυξάνεται η πυκνότητά του τυπικά από την εξίσωση

$$\rho(h) = \rho(0) * e^{\frac{-RT}{2GM}h} \quad (1.4)$$

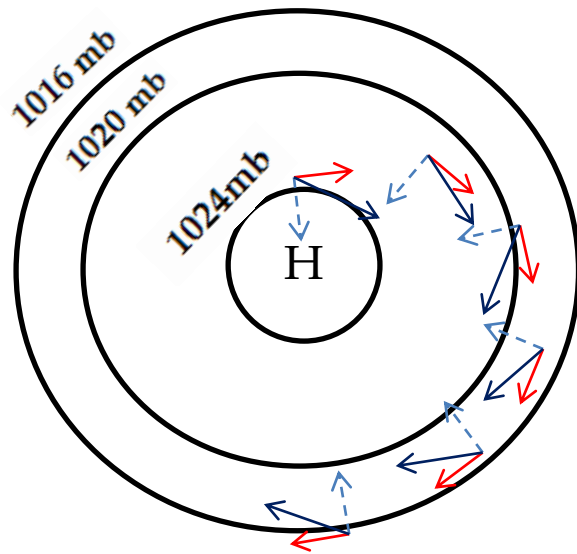
Πλέον αφού είναι βαρύτερος, λόγω αυξημένης πυκνότητας και άρα αυξημένης πίεσης από την καταστατική $p = \rho RT$, κατέρχεται προς τις περιοχές με χαμηλότερη πίεση. Όσο μεγαλύτερες είναι οι διαφορές πίεσης, μεταξύ δυο περιοχών, τόσο ισχυρότεροι άνεμοι δημιουργούνται. Οι διαφορές στην πίεση δημιουργούνται από την διαφορά θερμοκρασίας του αέρα. Αν δυο διπλανές, παρακείμενες περιοχές έχουν διαφορετική θερμοκρασία, τότε η ατμοσφαιρική πίεση της ψυχρής περιοχής είναι υψηλότερη από της θερμής περιοχής, με αποτέλεσμα αέρας να κινείται από την ψυχρότερη στην θερμότερη περιοχή, καθώς ο αέρας πηγαίνει από υψηλές σε χαμηλές πιέσεις. Πάνω από θάλασσες που δεν υπάρχουν και εμπόδια, η ένταση του ανέμου είναι σαφώς μεγαλύτερη. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται τα μεγάλα κυκλοφοριακά συστήματα στην Γη. Τυπικά τα συστήματα αυτά απαρτίζονται από Αληγείς ανέμους στην κυψέλη του Hadley ($0^\circ - 30^\circ$ γεωγραφικό πλάτος), Ανταληγείς ανέμους στην κυψέλη Ferrel ($30^\circ - 60^\circ$ γεωγραφικό πλάτος) και πολικά μέτωπα στην πολική κυψέλη (γεωγραφικά πλάτη άνω των 60°). (Μπεργελές Γ., 2006)

Υψηλά και Χαμηλά Βαρομετρικά Συστήματα – Ατμοσφαιρική Πίεση

Ένα χαμηλό βαρομετρικό σύστημα αποτελείται από κλειστές ισοβαρείς καμπύλες, με την πίεση να ελαττώνεται από την περιφέρεια προς το κέντρο. Λέγεται και κυκλώνας ή ύφεση. Αντιθέτως ένα υψηλό βαρομετρικό σύστημα ή αντικυκλώνας, αποτελείται από μια περιοχή υψηλών πιέσεων, με την πίεση να αυξάνει από την περιφέρεια προς το κέντρο.

Είναι γνωστό ότι ατμοσφαιρική ή αλλιώς βαρομετρική πίεση, είναι η πίεση που ασκεί η στήλη του αέρα που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια που μετράμε. Εξαρτάται επομένως και από το ύψος της ατμόσφαιρας. Ελαττώνεται όσο ανεβαίνουμε και αυξάνεται όσο κατεβαίνουμε. Το μέγεθος της πίεσης μετριέται στη μετεωρολογία σε hectopascal. Στην θάλασσα η μέση πίεση είναι 1013 hpa. Κάθε μεταβολή πίεσης υποδηλώνει μια ατμοσφαιρική διαταραχή. Σε χαμηλά βαρομετρικά συναντάμε πιέσεις 970 hpa , ενώ στα υψηλά βαρομετρικά έχουμε μέσες πιέσεις της τάξης των 1050 hpa. Συνήθως η αύξηση της ατμοσφαιρικής πίεσης προμηνύει καλοκαιρία.

Σε χαμηλά βαρομετρικά συστήματα (Χ ή L), οι άνεμοι κινούνται κατά την φορά των δεικτών του ρολογιού στο Νότιο ημισφαίριο, ενώ πνέουν κατά την αντίθετη φορά με τους δείκτες του ρολογιού στο Βόρειο. Μια ζώνη χαμηλής βαρομετρικής πίεσης αναρροφά αέρα από όλες τις κατευθύνσεις. Ένα χαμηλό βαρομετρικό δημιουργείται όταν ο ελαφρύτερος ζεστός αέρας που θερμαίνεται από το έδαφος ή την θάλασσα ανεβαίνει προς τα πάνω. Σε υψηλά βαρομετρικά συστήματα (Υ ή H), ο ψυχρότερος αέρας κατεβαίνει κινούμενος προς την περιφέρεια, εκεί όπου επικρατούν χαμηλά βαρομετρικά. Με την κίνησή του αυτή συμπιέζει τα κατώτερα στρώματα. Έτσι διαλύει τα σύννεφα και φέρνει καλό καιρό με λιακάδα το καλοκαίρι, ή κρύο αν είναι χειμώνας.



- - - - - → Δύναμη Coriolis
- — — — — → Πίεση προς χαμηλότερα βαρομετρικά
- — — — — → Ροή αέρα

Σχήμα 1.1: Υψηλό Βαρομετρικό στο Βόρειο ημισφαίριο

Ο αέρας στο γεωστροφικό ύψος κινείται σύμφωνα με την φορά των δεικτών του ρολογιού, και παράλληλα προς τις ισοβαρείς καμπύλες, όμως με κλίση $10^{\circ} - 15^{\circ}$ προς τις χαμηλές πιέσεις, προς την περιφέρεια, (επίδραση της δύναμης Coriolis). Συνέπεια αυτού είναι να έρχονται να καλύψουν την θέση τους ψυχρότερες και πυκνότερες αέριες μάζες, οι οποίες κατέρχονται από ψηλά σαν βαρύτερες που είναι. Έτσι δεν έχουμε ανοδική κίνηση του αέρα, οπότε δεν ευνοείται ο σχηματισμός νεφών και βροχοπτώσεων. Ευνοείται όμως ο σχηματισμός ομιχλών.

Βροχόπτωση

Είναι το φαινόμενο της υγρής κατακρήμνισης και ανήκει στα υδατώδη μετεωρολογικά κατακρημνίσματα ή υδρομετέωρα, φαινόμενα του νετού, όπως χαλάζι, χιονόνερο ή χιόνι. Για να συμβεί χρειάζεται ένα πυκνό στρώμα της ατμόσφαιρας με θερμοκρασία πάνω από $0^{\circ}C$, σχετικά κοντά στην επιφάνεια της Γης. Η συγκέντρωση των ατμοσφαιρικών υδρατμών πρέπει να είναι αρκετά υψηλή, ώστε αυτοί να υγροποιηθούν και να σχηματίσουν σταγόνες υγρού νερού, αρκετά βαριές ώστε να πέσουν στην επιφάνεια.

Πιο συγκεκριμένα απαιτείται:

- να ψυχθεί ο αέρας,
- να αυξηθεί η ατμοσφαιρική πίεση,
- να αυξηθεί η συγκέντρωση της σχετικής υγρασίας στην ατμόσφαιρα.

Όταν συντρέχουν οι παραπάνω συνθήκες τότε ελαττώνεται η ικανότητα του ατμοσφαιρικού αέρα να συγκρατήσει υδρατμούς σε αέρια μορφή για δεδομένη πίεση και θερμοκρασία. Ο σχηματισμός βροχής ή χιονιού κλπ, στην ουσία οφείλεται όπως προκύπτει και από τον κύκλο του νερού, στην εξάτμιση των υγρών μαζών, από θάλασσες, ποτάμια, λίμνες.

1.2 Στοιχεία από την βιβλιογραφία σχετικά με την αριθμητική πρόγνωση του καιρού

WRF και MM5

Τα λογισμικά WRF και MM5 ανήκουν στα τοπικά (regional) μοντέλα πρόγνωσης της μεσοκλίμακας. Κάνουν συνήθως 48ώρες προγνώσεις 2 φορές την ημέρα. Και τα δυο λογισμικά επιλύουν πανομοιότυπο πλέγμα και εξισώσεις ενώ λαμβάνουν τις αρχικές και οριακές τους συνθήκες από το NCEP's GFS model¹. Οι διαφορές τους εντοπίζονται στα μοντέλα φυσικής που χρησιμοποιούν, καθώς το MM5 συνήθως χρησιμοποιεί το Reisner II microphysics scheme [Reisner et al. \(1998\)](#) όσον αφορά τις επιλογές μικροφυσικής, ενώ το WRF χρησιμοποιεί το WSM3-σχήμα απλού πάγου που ακολουθεί το σχήμα [Hong et al. \(2004\)](#). Το MM5 χρησιμοποιεί το CCM2 radiation scheme, [Kiehl et al. \(1994\)](#) για την φυσική ακτινοβολίας της ατμόσφαιρας, ενώ το WRF χρησιμοποιεί το RRTM Longwave scheme, [Mlawer et al. \(1997\)](#). Όσον αφορά τις συνοριακές και πλανητικές οριακές συνθήκες τα δυο μοντέλα χρησιμοποιούν το WRF χρησιμοποιεί το YSU PBL scheme όπως περιγράφηκε από τους [\(Hong et al., 2006\)](#), ενώ το MM5 χρησιμοποιεί το MRF PBL scheme όπως περιγράφηκε από τους [Hong and Pan \(1996\)](#). Για την παραμετροποίηση των σύννεφων και τα δυο χρησιμοποιούν το απλό μοντέλο επαγωγικών σύννεφων [Kain and Fritsch scheme \(1993\)](#).

WRF και COAMPS

Το COAMPS όπως και τα WRF,MM5 αποτελεί ένα regional μοντέλο πρόγνωσης καιρού της μεσοκλίμακας. Κατατάσσεται στα short range forecasts λογισμικά με έμφαση σε ωκεανογραφικές προσομοιώσεις. Το COAMPS σε αντίθεση με τα άλλα

¹ Το NCEP's GFS model επιλύει ένα παγκόσμιο πλέγμα κάθε 6 ώρες και παρέχει τα απαραίτητα δεδομένα στα short range forecasts λογισμικά. Περισσότερα για τα δεδομένα αυτά με ορισμένες επεξηγήσεις υπάρχουν στο κεφάλαιο 3.2.5 και στην ιστοσελίδα <http://www ftp.ncep.noaa.gov/data/nccf/com/>

δυο λογισμικά, λαμβάνει τις οριακές του συνθήκες είτε από το κέντρο FNMOC² είτε από τον όμιλο HYCOM³. Τα αρχεία εισόδου που παρέχονται στο COAMPS, περιέχουν τα απαραίτητα 3-διάστατα πεδία σε κατάλληλη μορφή, όπως αρχικές προγνώσεις (παρατηρήσεις) και ταχύτητες, πληροφορίες εδάφους και πλευρικές οριακές συνθήκες. Διαφορές μεταξύ των δυο λογισμικών εντοπίζονται επίσης στην επεξεργασία των δεδομένων και στα μοντέλα φυσικής. Το COAMPS χρησιμοποιεί μια πολυπαραγοντική παρεμβολή των Baker et al (1992), ενώ το WRF χρησιμοποιεί το απλό σχήμα Smolarkiewicz et al (1992). Για την φυσική ακτινοβολίας της ατμόσφαιρας το COAMPS χρησιμοποιεί τις παραμετροποιήσεις για μεγάλου και μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίες των Harshvardhan et al. (1987), ενώ το WRF το RRTM Longwave scheme όπως προαναφέρεται. Όσον αφορά την φυσική επιφανείας, το COAMPS χρησιμοποιεί για τα κλιματικά αυτά δεδομένα μεταβλητές που βασίζονται στους Wilson and Henderson-Sellers (1985), Hummel and Reck (1979), ενώ το WRF χρησιμοποιεί το σχήμα Chen and Dudhia (2001). Και για τα δυο λογισμικά εφαρμόζεται το Kain and Fritsch (1993) όσον αφορά την παραμετροποίηση των σύννεφων.

Λογισμικό TAPM

Το TAPM (The Air Pollution Model) είναι ένα μη υδροστατικό αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης 3^{ων} διαστάσεων, που χρησιμοποιεί απλές εξισώσεις και διάφορες συνιστώσες μετεωρολογίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Για να είναι υπολογιστικά αποδοτικό, χρησιμοποιούνται και εδώ εσωτερικά πλέγματα εντός ενός μεγαλύτερου μητρικού, ώστε με αυτόν τον τρόπο να επιτυγχάνεται και υψηλότερη ανάλυση. Κάθε πλέγμα επικοινωνεί με το εσωτερικό του και πληροφορία μεταφέρεται από το ένα στο άλλο με ανατροφοδότηση. Στο μοντέλο χρησιμοποιούνται αστικές παραμετροποιήσεις διαφόρων παραμέτρων επιφανείας, (όπως το μήκος τραχύτητας και το ύψος μετατόπισης), για την εκτίμηση

² Το FNMOC (Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center) παρέχει στο COAMPS τα απαραίτητα πεδία και οριακές συνθήκες για επιχειρησιακή και ερευνητική λειτουργία. Τα δεδομένα παρέχονται στο <http://www.usgodae.org/ftp/outgoing/fnmoc/models/coamps/>

³ Το HYCOM επίσης παρέχει στο COAMPS τις απαραίτητες πρώτες προγνώσεις και αρχικές συνθήκες για τις προσομοιώσεις. Περισσότερα για τα δεδομένα αυτά στο <ftp://ftp.hycom.org/datasets/>

επιφανειακών τυρβωδών ροών. Επιλύει τις βασικές εξισώσεις μηχανικής των ρευστών και ηλιακής ακτινοβολίας για την πρόγνωση καιρού και συγκέντρωσης ρυπαντών.

Κέντρα πρόγνωσης που τρέχουν μετεωρολογικά μοντέλα και σύγκριση με το λογισμικό WRF

Το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών τρέχει το λογισμικό WRF, μια φορά κάθε μέρα, στις 00:00h UTC. Για τις προγνώσεις του χρησιμοποιεί δυο πλέγματα, ένα που καλύπτει την Ευρώπη χωρικής ανάλυσης 24km, και ένα που καλύπτει την Ελλάδα και τις διπλανές περιοχές, με χωρική ανάλυση 6km. Για τις προγνώσεις χρησιμοποιούνται αρχικές και οριακές συνθήκες από το GFS μοντέλο. Τρέχει επίσης και το αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης MM5 μια φορά κάθε ημέρα πάλι στις 00:00h UTC. Εδώ χρησιμοποιούνται 3 πλέγματα, ένα που καλύπτει την Ευρώπη με χωρική ανάλυση 24km, ένα που καλύπτει την Ελλάδα και τις γύρω χώρες, με χωρική ανάλυση 6km και ένα πλέγμα στην περιοχή της Αθήνας με χωρική ανάλυση 2km. Για τις προγνώσεις χρησιμοποιούνται και εδώ αρχικές και οριακές συνθήκες από το GFS μοντέλο.

Μελέτη επίδρασης αστικών πάρκων

Χρήση του WRF λογισμικού έγινε από τον τομέα Φυσικής Περιβάλλοντος και Μετεωρολογίας, του τμήματος Φυσικής, του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, ([Papangelis G. et al., 2011](#)). Σε αυτή τη μελέτη έγινε μια προσπάθεια πρόβλεψης των επιδράσεων που θα προκύψουν από αστικές πράσινες λύσεις στο εσωτερικό ενός αστικού και πυκνά δομημένου περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε ένα σενάριο χρήσης της γης ως αστικό πάρκο διαστάσεων 8 και 4 km², στην περιοχή του Ελαιώνα κοντά στο κέντρο της Αθήνας. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η χρήση ενός τέτοιου πάρκου θα έδιναν κατά την περίοδο της νύχτας μια ψύξη της τάξης των 5^oC.

Στην έρευνα αυτή έγινε χρήση του WRFV3.1.1, που περιλαμβάνει τον ARW ([Skamarock et al., 2008](#)), χρήση του Land Surface Model, LSM ([Chen & Dudhia, 2001](#),

Ek et al., 2003), και του απλού προτύπου αστικού θόλου (Tewari, Chen, Kusaka, & Miao, 2007). Για το πλανητικό οριακό στρώμα χρησιμοποιήθηκε το YSU scheme (Hong, Noh, & Dudhia, 2006).

Για το οριζόντιο χωρίο, χρησιμοποιήθηκαν 5 πλέγματα με χρήση του two-way nesting. Έτσι καταλήγουν σε υψηλή χωρική ανάλυση 5^{ου} πλέγματος των 0,5km. Στο κατακόρυφο χρησιμοποιήθηκαν 38 eta levels με κορυφή του μοντέλου τα 50hpa. Οι οριακές συνθήκες λήφθηκαν από το NCEP, GFS μοντέλο.

Χρήση διαφορετικών μοντέλων πλανητικού οριακού στρώματος (PBL schemes)

Σε συνεργασία που έγινε μεταξύ μηχανικών του Πολυτεχνείου της Ισπανίας στην Καταλονία, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και του τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών, γίνεται χρήση του WRF και των συνιστωσών αυτού (Robert F. Banks et al., 2015). Η μελέτη που έγινε εδώ έρχεται να απαντήσει στο αν ένα αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού μπορεί να αναπαράγει τις ίδιες συνθήκες σε διαφορετικούς ατμοσφαιρικούς τύπους ροών, σε ηπειρωτικού τύπου, σε μελέτμια και σε ανέμους Σαχάρας. Στην έρευνα χρησιμοποιούνται 8 διαφορετικοί τύποι πλανητικού οριακού στρώματος, πάνω από την ευρύτερη περιοχή της Αττικής.

Στην έρευνα αυτή έγινε χρήση του WRFV3.4.1 με τον ARW, (Skamarock et al., 2005). Χρησιμοποιούνται 3 πλέγματα. Ένα μητρικό πλέγμα πάνω από την Ευρώπη με (12 × 12km ; 481 × 401 κόμβους), και δυο one-way nesting πλέγματα, ένα για την Ελλάδα με (4 × 4km ; 202 × 202 κόμβους), και ένα για την ευρύτερη περιοχή της Αττικής με (1 × 1km ; 101 × 101 κόμβους). Οι οριακές συνθήκες λαμβάνονταν από την NCEP και το GFS μοντέλο. Πραγματοποιούνταν καθημερινές 36-h προγνώσεις με spin up 12 ωρών. Στο μοντέλο χρησιμοποιούνταν 38 eta levels, τα 13 εκ των οποίων βρισκόταν στα κατώτερα 3 km της ατμόσφαιρας. Η πίεση στην κορυφή του μοντέλου ήταν στα 50hpa.

Τα μοντέλα φυσικής που χρησιμοποιήθηκαν, περιελάμβαναν για τα σχήματα μικροφυσικής, το Single-Moment class-3 microphysics Scheme (Hong et al., 2004), για την παραμετροποίηση σύννεφων το Kain–Fritsch cumulus parameterization scheme (Kain, 2004), για την ακτινοβολία το Dudhia shortwave radiation scheme (Dudhia, 1989), και το Noah land-surface model (Tewari et al., 2004).

Οι δοκιμές έγιναν για διάφορα PBL schemes, όπως το MYJ, το MYJNN3, το MYJNN2, το YSU κλπ.

Κεφάλαιο 2 . Μέτρηση Μετεωρολογικών Μεγεθών

2.1 Μετεωρολογικοί σταθμοί και χρήση τους

Ένας μετεωρολογικός σταθμός είναι μια εγκατάσταση, είτε βρίσκεται στην ξηρά είτε στη θάλασσα, που διαθέτει τον απαραίτητο εξοπλισμό για την μέτρηση των ατμοσφαιρικών συνθηκών, παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για την πρόγνωση του καιρού και μελετά τις καιρικές και κλιματικές αλλαγές. Οι μετρήσεις αυτές περιλαμβάνουν μετεωρολογικά μεγέθη όπως τη θερμοκρασία, την βαρομετρική πίεση, την υγρασία, την ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου, τα μεγέθη καθίζησης όπως βροχή, χιόνι καθώς και άλλα υδρομετέωρα, ανάλογα την πολυπλοκότητα και την πληρότητα σε όργανα μέτρησης. Οι ανεμολογικές μετρήσεις πρέπει να λαμβάνονται με όσο το δυνατόν λιγότερα εμπόδια, συνήθως σε υψώματα όπου εξαλείφονται οι επιδράσεις από κτίρια, υψηλά δέντρα και άλλες επιδράσεις στην τοπογραφία. Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας και της υγρασίας, ιδανικά θα λαμβάνονται υπό σκίαση, χωρίς την επίδραση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Ένας μετεωρολογικός σταθμός λαμβάνει μετρήσεις τουλάχιστον μια φορά την ώρα. Οι καιρικές συνθήκες στην θάλασσα λαμβάνονται από πλοία ή σημαδούρες και θαλάσσιους πλωτήρες, τα οποία μετρούν ελαφρώς διαφορετικές μετεωρολογικές ποσότητες, όπως η θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας ή το ύψος του κυματισμού.

Συνήθως οι μετεωρολογικοί σταθμοί έχουν ένα θερμόμετρο για μέτρηση της θερμοκρασίας της ξηράς και της θάλασσας. Έχουν ένα βαρόμετρο για μέτρηση της ατμοσφαιρικής πίεσης, ένα υγρόμετρο για μέτρηση της υγρασίας στην ατμόσφαιρα. Για την μέτρηση της ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου έχουν ανεμόμετρο ενώ για την ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται το πυρανόμετρο ή ακτινόμετρο. Επίσης χρησιμοποιείται βροχόμετρο όσον αφορά την ατμοσφαιρική κατακρήμνιση. Σε ορισμένους μετεωρολογικούς σταθμούς αεροδρομίων, χρησιμοποιούνται όργανα για την μέτρηση και άλλων σημαντικών παραμέτρων, όπως το ακριβές μέγεθος της κατακρήμνισης, την ορατότητα, την πύκνωση των νεφών και το ύψος των σύννεφων. Πιο εξελιγμένοι σταθμοί μπορεί να μετρούν επίσης υγρασία εδάφους, υγρασία φυλλώματος, υπεριώδη ακτινοβολία, θερμοκρασία εδάφους και νερού, κοντά σε λίμνες, ποτάμια, ρυάκια.

Οι συνοπτικοί μετεωρολογικοί σταθμοί είναι όργανα που συλλέγουν μετεωρολογικές πληροφορίες σε συνοπτικό χρόνο, συνήθως στις 00h, 06h, 12h, 18h (UTC)⁴, αλλά και στις ενδιάμεσες 03h, 09h, 15h, 21h (UTC). Τα κοινά όργανα που χρησιμοποιούν είναι το θερμόμετρο, το ανεμόμετρο και ο ανεμοδείκτης, το βροχόμετρο, υγρόμετρο. Συνήθως κωδικοποιούν τα μετρούμενα μεγέθη σε κατάλληλη μορφή όπου και εισάγονται σε αριθμητικά μετεωρολογικά μοντέλα πρόγνωσης.

2.2 Πειραματικοί σταθμοί ερασιτεχνικής χρήσης

Ένας προσωπικός πειραματικός μετεωρολογικός σταθμός αποτελεί ένα σύνολο οργάνων μέτρησης καιρικών δεδομένων, και λειτουργεί είτε από κάποιον ιδιώτη, σύλλογο, όμιλο, ή ακόμα και από μια επιχείρηση, (άσχετα με το αν η απόκτηση και η διάδοση καιρικών στοιχείων, είναι ο σκοπός της λειτουργίας τους). Η ποιότητα και η ποσότητα του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται, μπορεί να ποικίλλει, όπως επίσης και ο τρόπος εγκατάστασης του. Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η μελέτη πριν από οποιαδήποτε επιχειρησιακή λειτουργία και εγκατάσταση.

Οι σημερινοί προσωπικοί μετεωρολογικοί σταθμοί περιλαμβάνουν πέρα από τα βασικά όργανα μέτρησης και μια ξεχωριστή ψηφιακή κονσόλα που παρέχει τις ενδείξεις των δεδομένων που συλλέγονται. Οι κονσόλες αυτές πλέον συνδέονται με τον προσωπικό υπολογιστή του χρήστη, όπου και αποθηκεύονται τα δεδομένα, τα οποία είτε μπορούν να αποστέλλονται σε άλλους διαδικτυακούς τόπους είτε επεξεργάζονται περαιτέρω.

Οι προσωπικοί μετεωρολογικοί σταθμοί μπορούν να λειτουργούν αποκλειστικά και μόνο για την ψυχαγωγία και εκπαίδευση του κατόχου. Υπάρχουν όμως και οργανισμοί που κατέχουν μετεωρολογικούς σταθμούς τα δεδομένα των οποίων μοιράζονται με άλλους, και είτε αρχικά τα επεξεργάζονται είτε τα διανέμουν απευθείας διαδικτυακά. Πιο συγκεκριμένα το CWOP⁵ είναι ένα τέτοιο πρόγραμμα και τα δεδομένα που υποβάλλονται μέσω της χρήσης αυτού του λογισμικού, της χρήσης του υπολογιστή και του internet, χρησιμοποιούνται έπειτα από την Εθνική

⁴ UTC : Universal Time Coordinated

⁵ CWOP: Citizen Weather Observer Program <http://wxqa.com/>

Μετεωρολογική Υπηρεσία, για την δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης καιρού και άλλων συνιστωσών όπως ρύπανση και έκθεση σε αέρια σωματίδια. Το Weather Underground⁶ είναι επίσης ένας δημοφιλής οργανισμός για την υποβολή και ανταλλαγή δεδομένων με τρίτους.

2.3 Εγκατάσταση του μετεωρολογικού σταθμού Davis Instruments

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εγκαταστάθηκε μετεωρολογικός σταθμός της Davis Instruments με αριθμό μοντέλου 7978, στην οροφή του κτηρίου ANΥΜ⁷, σε γεωγραφικό πλάτος, μήκος 37.97453 και 23.76828 αντίστοιχα. Η εγκατάσταση του έγινε με προσοχή και ακολουθώντας τις οδηγίες από παρεμφερή μετεωρολογικό σταθμό της ίδιας της εταιρείας⁸. Το στήριγμα του μετεωρολογικού ιστού βρίσκεται στην βορεινή πλευρά (υψηλότερο σημείο) και στην γωνία του κτηρίου, για να υπάρχει όσο το δυνατόν λιγότερη επίδραση από τη θερμοκρασία του μπετόν της ταράτσας. Τοποθετήθηκε σε περίπου 2,1m ύψος από την επιφάνεια της οροφής για να μην εμποδίζεται η ροή του ανέμου από τα υπόλοιπα κτίρια, δένδρα και άλλες μικροκλιματικές επιδράσεις⁹.

Πλέον γίνεται η ηλεκτρονική καταγραφή των μετεωρολογικών παραμέτρων που περιγράφηκαν και στην προηγούμενη σελίδα, ύστερα από εύρεση του κατάλληλου λογισμικού Weather Display¹⁰. Με τον τρόπο αυτό λειτουργεί επιχειρησιακά ο σταθμός, με επιλογή προβολής μιας περίληψης των παροντικών καιρικών μεγεθών στην ιστοσελίδα του εργαστηρίου Καινοτόμων Τεχνολογιών Προστασίας Περιβάλλοντος του τομέα ρευστών LIET¹¹. Έτσι επιτυγχάνεται η σύγκριση των μετρήσεων ενός μετεωρολογικού σταθμού ερασιτεχνικής χρήσης με αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης.

⁶ Weather Underground Program: <https://www.wunderground.com/>

⁷ ANΥΜ: κτίριο Αεροδυναμικής Ναυπηγικής και Υδροδυναμικών Μηχανών

⁸ Οδηγίες για την σωστή εγκατάσταση του μετεωρολογικού ιστού Davis 7978 από τον ιστότοπο http://www.davisnet.com/product_documents/weather/manuals/07395-249_IM_06152.pdf σελ. 15-18

⁹ Οδηγίες για την εγκατάσταση μετεωρολογικού ιστού στο δομημένο περιβάλλον
i) <http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-81/IOM-81-UrbanMetObs.pdf>

ii) <https://ambientweather.wikispaces.com/Weather+Station+Mounting+Solutions>

¹⁰ Λογισμικό Weather Display: <http://www.weather-display.com/index.php>

¹¹ LIET: Εργαστήριο Καινοτόμων Τεχνολογιών Προστασίας Περιβάλλοντος <http://www.liet.ntua.gr/>

Παρακάτω εμφανίζονται η τοποθεσία της εγκατάστασης του μετεωρολογικού ιστού με περιγραφή των επιμέρους συνιστωσών του και ορισμένων τεχνικών χαρακτηριστικών τους.



Σχήμα 2.1: Μετεωρολογικός Ιστός Davis Instruments εγκατεστημένος στο κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ



Σχήμα 2.2: Βροχόμετρο μετεωρολογικού σταθμού εγκατεστημένου στο κτίριο ANΥΜ, ΕΜΠ

Περίπου στο κέντρο του Σχήματος 2.1 είναι τοποθετημένο το βροχόμετρο του σταθμού με την βάση του (Rain Collector), που εδώ παρουσιάζονται σε μεγέθυνση. Το βροχόμετρο είναι ένα από τα πρώτα μετεωρολογικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων, καθώς δεν χρειάζεται κάτι παραπάνω από το δοχείο περισυλλογής και μια βαθμομετρική κλίμακα. Στη βάση του κώνου μοντάρονται επιπλέον εσωτερικές συνιστώσες του βροχόμετρου, που απαρτίζουν τον εσωτερικό μηχανισμό για την μέτρηση. Περισσότερες πληροφορίες για το όργανο υπάρχουν στο ηλεκτρονικό εγχειρίδιο του σταθμού.

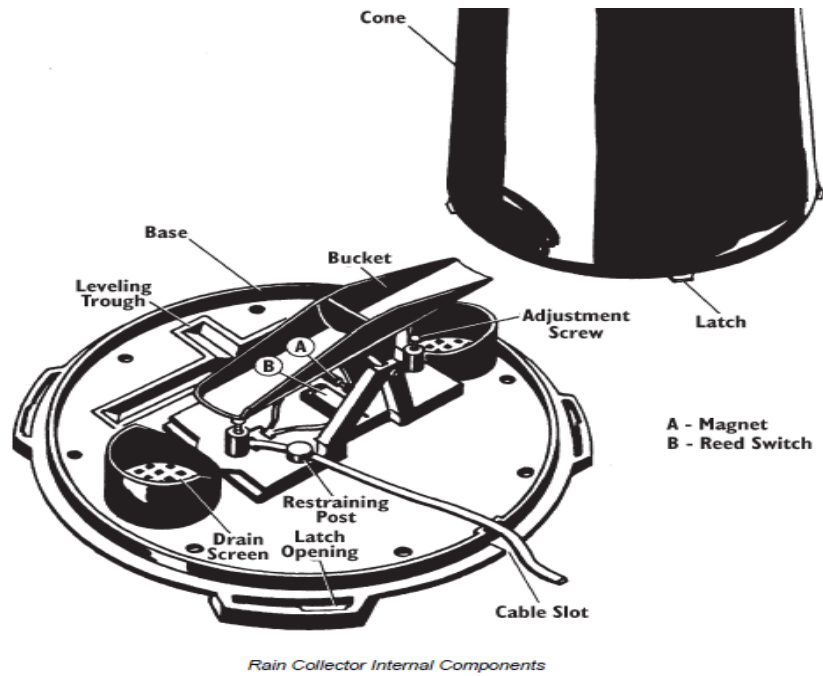
Ακρίβεια βροχόμετρου:

$\pm 3\%$ ή ± 1 για καταμέτρηση βροχόπτωσης ανάμεσα σε 0,01" και 2,00" ανά ώρα, που ισοδυναμεί με 0,2 mm και 50,0 mm ανά ώρα.

$\pm 5\%$ ή ± 1 για καταμέτρηση βροχόπτωσης ανάμεσα σε 2,00" and 4,00" ανά ώρα, που ισοδυναμεί με 50,0 mm και 100,0 mm ανά ώρα.

Ανάλυση βροχόμετρου:

0,01" ή 0,2 mm



Σχήμα 2.3: Επιμέρους εσωτερικές συνιστώσες βροχόμετρου μετεωρολογικού σταθμού εγκατεστημένο στο κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ

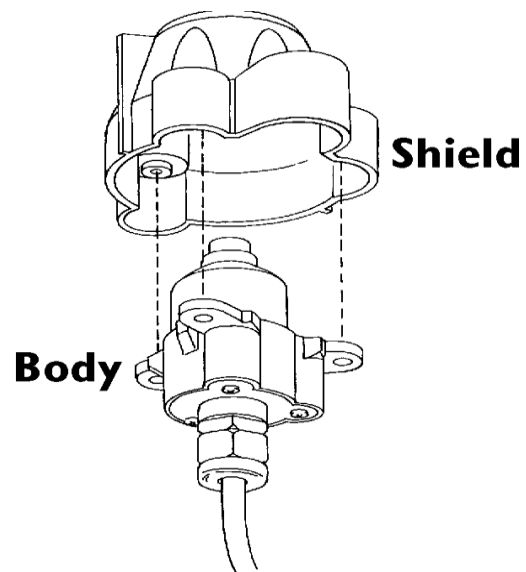


Σχήμα 2.4: Αισθητήρας μέτρησης θερμοκρασίας περιβάλλοντος εγκατεστημένος στο κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ

Στο Σχήμα 2.4 εμφανίζεται ο αισθητήρας μέτρησης της εξωτερικής θερμοκρασίας αέρα (Air Temperature Sensor), ο οποίος βρίσκεται πρόχειρα δεμένος στο στύλο του μετεωρολογικού σταθμού. Ο αισθητήρας αυτός εκτός από την εξωτερική θερμοκρασία του αέρα είναι κατάλληλος για μέτρηση της θερμοκρασίας του εδάφους ή του νερού. Διαθέτει ένα καλώδιο μήκους 12m. Περισσότερες πληροφορίες για το όργανο βρίσκονται στο ηλεκτρονικό εγχειρίδιο του σταθμού.

Ακρίβεια θερμομέτρου:

Ο αισθητήρας θερμοζεύγους τύπου (K) αποθηκεύει τα δεδομένα θερμοκρασίας σε (°C), με ακρίβεια αποθήκευσης και μέτρησης ενός δεκαδικού ψηφίου.



Σχήμα 2.5: Αισθητήρας ηλιακής ακτινοβολίας εγκατεστημένος στο κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ

Ο αισθητήρα ηλιακής ακτινοβολίας (Solar Radiation Sensor) φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Τοποθετείται στο αριστερό μέρος του μετεωρολογικού ιστού και περίπου στην μέση. Η δεξιά εικόνα απεικονίζει το κυρίως σώμα του αισθητήρα με τον κλωβό προστασίας του. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας είναι ένα από τα πιο ευαίσθητα

όργανα του μετεωρολογικού σταθμού. Καταγράφει ηλιακή ακτινοβολία άμεση και έμμεση. Μετρά και καταγράφει επιπλέον μεγέθη για την ατμόσφαιρα όπως η ακτινοβολία UV, το μέγεθος της εξατμισοδιαπνοής. Περισσότερες πληροφορίες υπάρχουν στο ηλεκτρονικό αρχείο του οργάνου.

Ακρίβεια αισθητήρα ηλιακής ακτινοβολίας:

Ο αισθητήρας ηλιακής ακτινοβολίας μετρά και καταγράφει τα μεγέθη ηλιακής ακτινοβολίας σε W/m^2 ενώ το μέγεθος της εξατμισοδιαπνοής σε mm .



Σχήμα 2.6: Αισθητήρας μέτρησης θερμουγραμετρικών συνθηκών εγκατεστημένος στο κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ

Στο Σχήμα 2.6 απεικονίζεται ο αισθητήρας για τις μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας του σταθμού(Temperature/Humidity Sensor). Τοποθετήθηκε στο αριστερό τμήμα του μετεωρολογικού σταθμού. Μετρά και καταγράφει επιπλέον μεγέθη για

τον σταθμό όπως το σημείο δρόσου. Διαθέτει ένα καλώδιο Για περισσότερες πληροφορίες υπάρχει διαθέσιμο το ηλεκτρονικό αρχείο του οργάνου.

Ακρίβεια οργάνων:

Αισθητήρας θερμοκρασίας

Εύρος: -45 °C έως 60 °C (-50 ° έως 140 ° F)

Ανάλυση: 0,1 °C (0.1 °F)

Ακρίβεια: ± 0,5 °C (± 1 °F)

Υγρόμετρο

Εύρος: 0 έως 100% RH

Ανάλυση: 1% RH

Ακρίβεια: ± 3%



Σχήμα 2.7: Ανεμόμετρο και ανεμοδείκτης μετεωρολογικού ιστού εγκατεστημένο στο κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ

Στο Σχήμα 2.7 απεικονίζεται το κυπελλοφόρο ανεμόμετρο και ο ανεμοδείκτης του σταθμού (Anemometer). Τα όργανα αυτά είναι τοποθετημένα στο δεξί μέρος του μετεωρολογικού ιστού, σε ύψος μεγαλύτερο των 2,1m όπου δεν επηρεάζεται η ροή του ανέμου από τα γύρω εμπόδια, (δένδρα και κτίρια). Ο ανεμοδείκτης μετρά και καταγράφει την κατεύθυνση του ανέμου ενώ το ανεμόμετρο καταγράφει την ταχύτητα του ανέμου, την αίσθηση ψύχους και άλλα μεγέθη όπως την χιλιομετρική απόσταση που έχει διανύσει ο άνεμος. Διαθέτει ένα καλώδιο 12,2m. Περισσότερες πληροφορίες για την διάταξη του ανεμόμετρου και ανεμοδείκτη υπάρχουν στο ηλεκτρονικό εγχειρίδιο.

Ακρίβεια οργάνων:

Ανεμοδείκτης

Εύρος: 16 σημεία των 22,5° για το ρόδο ανέμου

Ακρίβεια: $\pm 3^\circ$

Κυπελλοφόρο ανεμόμετρο

Εύρος: 0,5 έως 89 m/s ή (1 έως 200 mph), (1 έως 322 km/h), (1 έως 173 kts)

Ακρίβεια: 1 m/s ή (± 2 mph), (3 km/h), (2kts)



Σχήμα 2.8: Ηλεκτρονική κονσόλα και συσκευή μεταφοράς των κατακρατούμενων μεγεθών του μετεωρολογικού σταθμού Davis Instruments, εγκατεστημένα στο κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ

Στο Σχήμα 2.8 απεικονίζονται η ηλεκτρονική κονσόλα του σταθμού(Energy Enviromonitor) καθώς και η συσκευή μεταφοράς των καταγραφόμενων μεγεθών από τον σταθμό στον υπολογιστή(Weatherlink/Envirolink Isolator). Τα δυο αυτά όργανα βρίσκονται σε εσωτερικό χώρο στον 3^ο όροφο του κτηρίου ΑΝΥΜ.

Αρχικά καθορίστηκε στην ηλεκτρονική κονσόλα η ημερομηνία και η ώρα της τοποθεσίας. Έπειτα έγινε η ρύθμιση των μονάδων των μετρούμενων μεγεθών ακολουθώντας το ηλεκτρονικό εγχειρίδιο. Πλέον μέσω του Weather link τα μετρούμενα μεγέθη μεταφέρονται στον υπολογιστή και απεικονίζονται μέσω του προγράμματος Weather Display, ενώ επίσης γίνεται και η αναγκαία επεξεργασία τους για την σύγκριση με αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού. Περισσότερες πληροφορίες για τις δυο αυτές συνιστώσες του σταθμού υπάρχουν διαθέσιμες στο ηλεκτρονικό τους εγχειρίδιο.

2.4 Τα μετεωρολογικά όργανα SODAR και MTP5

Για τις περιπτώσεις του Setup_2 (κεφάλαιο 4.1) που αφορούν την περιοχή της Κοζάνης τον Αύγουστο και τον Φεβρουάριο, χρησιμοποιήθηκαν όπως είναι φυσικό μετεωρολογικά όργανα στην ευρύτερη περιοχή.



Σχήμα 2.9: Μετρητικό όργανο SODAR, εγκατεστημένο στην περιοχή της Κοζάνης (γ.π 40.301718°, γ.μ. 21.8000835°)

Για τις μετρήσεις των ταχυτήτων ανέμου χρησιμοποιήθηκε το μετρητικό όργανο SODAR¹² (Sonic Detection And Ranging), το οποίο όμως τοποθετήθηκε στην οροφή κτιρίου συνολικού ύψους 707m από την θάλασσα, σε γεωγραφικό πλάτος, μήκος 40.301718°, 21.8000835°. Το συγκεκριμένο μετεωρολογικό όργανο είναι ένα ραντάρ με υπερήχους για την μέτρηση της σκέδασης των ηχητικών κυμάτων από τις ατμοσφαιρικές αναταράξεις. Μεταδίδει σύντομους και υψηλής ακουστικής ισχύος παλμούς ορισμένων συχνοτήτων στην ατμόσφαιρα. Με τον τρόπο αυτό καταγράφονται ταχύτητες ανέμου σε διάφορα ύψη πάνω από το έδαφος. Έτσι λαμβάνονται μετρήσεις μέχρι και τα 400m υψόμετρο πάνω από κτίριο.

¹² Περισσότερα για το μετεωρολογικό όργανο SODAR υπάρχουν στον παρακάτω σύνδεσμο: <https://en.wikipedia.org/wiki/SODAR>



Σχήμα 2.10: Μετρητικό όργανο MTP-5 εγκατεστημένο στην περιοχή της Κοζάνης (γ.π 40.298809°, γ.μ. 21.799331°)

Για τις μετρήσεις της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε το όργανο MTP5¹³, το οποίο τοποθετήθηκε εντός κτιρίου στην πόλη της Κοζάνης, σε γεωγραφικό πλάτος , μήκος 40.298809°, 21.799331°. Είναι ένα όργανο ανίχνευσης μικροκυμάτων, το οποίο μετρά την ακτινοβολία που εκπέμπεται στα πρώτα 1000 m της ατμόσφαιρας, εντός του πλανητικού οριακού στρώματος. Η ατμοσφαιρική ακτινοβολία οριζόντια και κάθετη μετράται με σάρωση κατά γωνιακά βήματα. Έτσι αποδίδονται κατόπιν επεξεργασίας πληροφορίες για τα προφίλ των θερμοκρασιών στο κατακόρυφο ύψος κάθε 5 λεπτά και για διαστήματα 50 m ύψος. Με το όργανο αυτό είχαμε μετρήσεις μέχρι και 600 m υψόμετρο πάνω από το κτίριο.

¹³ Περισσότερα για το μετεωρολογικό όργανο MTP5 βρίσκονται εδώ: <http://attex.net/EN/mtp5.php> και εδώ: <http://mtp5.ru/>

Κεφάλαιο 3 . Αριθμητική Πρόγνωση Καιρού

3.1 Αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού

Τα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού χρησιμοποιούνται για πρόγνωση του καιρού από διάφορες μετεωρολογικές υπηρεσίες. Κάνουν πρόγνωση των καιρικών, κλιματικών αλλαγών, ενώ παρέχουν τα απαραίτητα μετεωρολογικά δεδομένα για πρόγνωση της αέριας ρύπανσης και έκθεσης. Η παραπάνω λειτουργία αποτελεί έναν αλυσιδωτό συνδυασμό ενός μετεωρολογικού μοντέλου, ενός μοντέλου διασποράς/φωτοχημείας και ενός μοντέλου έκθεσης/δόσης του πληθυσμού.

Ένα αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης αποτελεί κωδικοποίηση σε πρόγραμμα υπολογιστή (συνήθως σε γλώσσα Fortran) όλων των μαθηματικών εξισώσεων που περιγράφουν τα φυσικά φαινόμενα της ατμόσφαιρας. Η λύση των παραπάνω εξισώσεων απαιτεί επιπλέον λογισμικό, όπως διάφορες υπορουτίνες για την επεξεργασία κατάλληλα διαμορφωμένων αρχείων εισόδου (μετεωρολογικά και στατικά δεδομένα), καθώς και άλλα λογισμικά για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων και την δημιουργία γραφικών παραστάσεων.

Οι παραπάνω μερικές διαφορικές εξισώσεις δεν έχουν αναλυτικές λύσεις πέραν πολύ εξιδανικευμένων περιπτώσεων, οπότε επιλύονται με την χρήση διαφόρων αριθμητικών μεθόδων. Λόγω του αριθμού των πράξεων και των επαναληπτικών διαδικασιών κρίνεται αναγκαία η χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Κέντρα πρόγνωσης καιρού που «τρέχουν» αριθμητικά μοντέλα υπάρχουν στην Γαλλία, την Γερμανία, την Ιταλία, την Αυστραλία, την Ρωσία και αλλού. Η Ελληνική εθνική μετεωρολογική υπηρεσία (ΕΜΥ) χρησιμοποιεί προγνωστικά δεδομένα από την Μ. Βρετανία και συμμετέχει στο λεγόμενο Consortium for Small scale modeling ή COSMO model.

Υπάρχουν δυο τύποι αριθμητικών μοντέλων πρόγνωσης, τα λεγόμενα global ή παγκόσμια και τα regional ή τοπικά. Τα global χρησιμοποιούνται για προγνώσεις μεσαίας κλίμακας συνήθως 2 ή και περισσότερων ημερών (medium range forecasts), για προσομοιώσεις κλίματος. Επιλύουν παγκόσμιο πλέγμα καλύπτοντας ολόκληρη την Γη, με χαμηλή χωρική ανάλυση. Τα regional αφορούν προγνώσεις με 2 ή

περισσότερες φορές υψηλότερη χωρική ανάλυση από τα global models. Τα πλεονεκτήματα των τελευταίων είναι η μεγαλύτερη ακρίβεια για την περιοχή ενδιαφέροντος, η πρόβλεψη φαινομένων μικρής κλίμακας (όπως για παράδειγμα τα τοπικά μέτωπα) και η καλύτερη επίδραση της τοπογραφίας. Μειονέκτημα αποτελεί όμως η αναγκαιότητα επιβολής συνοριακών συνθηκών στα όρια της περιοχής υπολογισμού (πλευρικές οριακές συνθήκες), καθώς και το γεγονός ότι εγκαθίστανται επιπλέον εσωτερικά πλέγματα για προσομοίωση, κάτι χρονικά και υπολογιστικά δαπανηρό.

Η κινήσεις των αερίων μαζών στην ατμόσφαιρα μπορούν να καταταγούν σε κλίμακες αναλογικά πάντα με την διάσταση του μήκους χωρίου που εξετάζουν.

Πίνακας 3.1 Κατάταξη των ατμοσφαιρικών κινήσεων

Κατηγορία Κλίμακας	Διαστάσεις Κλίμακας	Περιοχές Ενδιαφέροντος
Μοριακή Κλίμακα	$\ll 2 \text{ mm}$	μοριακή διάχυση, μοριακό ιξώδες
Μικροκλίμακα	από 2 mm έως 2 km	δίνες, μικρά πλούμια άνωσης, καυσαέρια αυτοκινήτων, επιδράσεις πυκνών σύννεφων
Μεσοκλίμακα	από 2 έως 2000 km	βαρυντικά κύματα, καταιγίδες, ανεμοστρόβιλοι, συμπλέγματα σύννεφων, τοπικοί άνεμοι, αστική ατμοσφαιρική ρύπανση
Ευρεία Κλίμακα	από 500 έως 10000 km	συστήματα υψηλού και χαμηλού βαρομετρικού, μέτωπα καιρού, τροπικές καταιγίδες, τυφώνες
Παγκόσμια Κλίμακα	$> 10000 \text{ km}$	παγκόσμια συστήματα ανέμου, πλανητικά κύματα, στρατοσφαιρική μείωση του όζοντος, φαινόμενο του θερμοκηπίου

Το ενδιαφέρον αυτής της διπλωματικής εντοπίζεται σε μεγέθη που αφορούν την **μεσοκλίμακα**, με έμφαση στις τοπικές ταχύτητες του ανέμου και τις θερμοκρασίες καθ' ύψος του χωρίου. Ορισμένα μη υδροστατικά μετεωρολογικά μοντέλα που «τρέχουν» σε διαστάσεις μεσοκλίμακας της τάξης των μερικών χιλιομέτρων όπως αναφέρεται παραπάνω είναι:

- το ARPS (Advanced Regional Prediction System)
- το COAMPS (US Navy's Coupled Ocean / Atmosphere Mesoscale Prediction System)
- το MM5 (Penn State/NCAR Mesoscale Model, version 5)
- το RSM (NCEP Regional Spectral Model)
- το TAPM (The Air Pollution Model)
- το WRF (Weather Research and Forecasting Model)

Τα παραπάνω προγνωστικά μετεωρολογικά μοντέλα επιλύουν τις εξισώσεις διατήρησης που αναφέρονται σε έναν στοιχειώδη όγκο αέρα (βλ. κεφάλαιο 3.2.3 για λεπτομέρειες), δηλαδή:

- διατήρηση των 3^{ων} συνιστωσών της ορμής (εξισώσεις κίνησης)
- διατήρηση της ενέργειας (1^{ος} θερμοδυναμικός νόμος)
- διατήρηση της μάζας του ξηρού αέρα (εξίσωση της συνέχειας)
- διατήρηση της υγρασίας (μάζα νερού στις 3 φάσεις)
- καταστατική εξίσωση των αερίων

Με αυτόν τον τρόπο επιλύονται οι ταχύτητες στις 3 κατευθύνσεις u, v, w , η πυκνότητα ρ , η θερμοκρασία T , η πίεση P , και οι αναλογίες μαζών νερού στις 3 φάσεις του, $q_i, i=1,2,3$.

Οι παραπάνω εξισώσεις διατήρησης απλοποιούνται. Σε πρώτη φάση προσδιορίζονται οι σχετικές τιμές των όρων των εξισώσεων κίνησης, ενώ οι μικρότεροι όροι αγνοούνται. Στην εξίσωση κατακόρυφης κίνησης η κατακόρυφη επιτάχυνση θεωρείται αμελητέα σε σχέση με την βαρυτική άνωση. Για τις εξισώσεις συνέχειας θεωρούμε ασυμπίεστη μορφή, εφόσον η πυκνότητα δεν αλλάζει σημαντικά σε σχέση με την μέση τιμή της.

3.2 Λογισμικό WRF και οι συνιστώσες του

3.2.1 Εισαγωγή

Το WRF(=Weather Research and Forecasting Model) είναι ένα σύστημα αριθμητικής πρόγνωσης του καιρού με ατμοσφαιρική προσομοίωση, σχεδιασμένο για ερευνητική και επιχειρησιακή λειτουργία. Αποτελεί κοινό εργαλείο για πανεπιστημιακές/ερευνητικές κοινότητες και άλλες επιχειρήσεις, για να επιτύχει στενότερους δεσμούς μεταξύ τους και να απαντήσει στις ανάγκες τους.

Η ανάπτυξη του WRF είναι μια προσπάθεια να δημιουργηθεί η επόμενη γενιά μοντέλου για πρόγνωση των καιρικών φαινομένων μεσοκλίμακας και μέσω της ενσωμάτωσης δεδομένων από πειραματικές μετρήσεις, την ταχύτερη λειτουργία του σε επιχειρησιακό επίπεδο. Το στήσιμο του κώδικά του, τον καθιστά ένα εύχρηστο υπολογιστικό πακέτο για μια ποικιλία από υπολογιστικά συστήματα είτε είναι υπερυπολογιστές είτε laptops. Καλύπτει ένα ευρύ φάσμα επιλογών Φυσικής και Δυναμικής.

Το WRF θεωρείται ωστόσο και ως ένα μοντέλο επικοινωνίας που υποστηρίζει ευρεία χρήση παγκοσμίως σε έρευνα και εκπαίδευση. Είναι κατάλληλο για μια ποικιλία εφαρμογών οι οποίες μπορούν να περιλαμβάνουν α) αριθμητική πρόγνωση καιρού σε πραγματικό χρόνο, b) μελέτες πρόγνωσης κατόπιν ενσωμάτωσης πειραματικών δεδομένων και παρατηρήσεων, c) τοπικές κλιματικές προσομοιώσεις, d) προσομοιώσεις σε ιδανικές συνθήκες, κ.α.

Το WRF περιλαμβάνει τον ARW , έναν επιλυτή δυναμικών συστημάτων όπως επίσης και άλλες συνιστώσες συμβατές με τον ARW επιλυτή, τα οποία όλα μαζί συνεργάζονται για την παραγωγή μιας προσομοίωσης. Έτσι προκύπτει ένα υποσύνολο της WRF προσομοίωσης, που εκτός από τον επιλυτή περιλαμβάνει συστήματα φυσικής, επιλογές αριθμητικής/δυναμικής, διάφορες υπορουτίνες αρχικοποίησης των μεγεθών και ένα ακόμη πακέτο αφομοίωσης των δεδομένων (WRFDA).

3.2.2 Κύρια χαρακτηριστικά του ARW συστήματος

Ο ARW επιλυτής δυναμικών συστημάτων πολύ περιληπτικά επιλύει τις εξισώσεις Euler πλήρως συμπιεστού ρευστού, και μη υδροστατικές. Περιλαμβάνει αρκετές μεταβλητές πρόγνωσης, όπως τις συνιστώσες ταχύτητας u και v στο Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, την κάθετη ταχύτητα w , την δυναμική διαταραχή της θερμοκρασίας, τις διαταραχές του γεωδυναμικού και την επιφανειακή πίεση και διαταραχή του ξηρού αέρα. Προαιρετικά μπορεί να περιλαμβάνει την τυρβώδη κινητική ενέργεια αλλά και ένα πλήθος από άλλα βαθμωτά μεγέθη όπως ο λόγος ανάμειξης υγρού/ατμού, βροχής/χιονιού καθώς και άλλων χημικών ειδών. (μπορούν να ενεργοποιηθούν μέσω του WRFRegistry¹⁴ με εσωτερική αλλαγή του WRF υποσυστήματος).

Όσον αφορά το κατακόρυφο σύστημα, η τοπογραφία που χρησιμοποιείται ακολουθεί την ξηρή υδροστατική πίεση. Υπάρχει ωστόσο δυνατότητα επέκτασης του κατακόρυφου πλέγματος με καθορισμό των επιπέδων πίεσης. Χρησιμοποιείται ένα τύπου-C οριζόντιο κλιμακωτό πλέγμα.

Έχουμε μια χρονικά διαιρούμενη ολοκλήρωση με χρήση 2^{ης} ή 3^{ης} τάξης RUNGE KUTTA συστήματος και μικρότερο χρονικό βήμα για ακουστικές και άλλες μεθόδους. Υπάρχει δυνατότητα μεταβολής του χρονικού βήματος. Για την χωρική διακριτοποίηση χρησιμοποιούνται 2^{ης} ως και 6^{ης} τάξης όροι μεταφοράς για το οριζόντιο ή το κατακόρυφο πλέγμα.

Οι αρχικές συνθήκες είναι 3^{ων} διαστάσεων για προσομοιώσεις πραγματικών δεδομένων και μιας, δυο ή και 3^{ων} διαστάσεων για προσομοιώσεις σε ιδανικές συνθήκες. Οι πλευρικές οριακές συνθήκες προκύπτουν από περιοδικές, συμμετρικές αλλά και πιο εξειδικευμένες επιλογές. Για τις κατακόρυφες οριακές συνθήκες χρησιμοποιούνται εξισώσεις απορρόφησης βαρυτικού πεδίου, (συμπεριλαμβανομένης της διάχυσης και απόσβεσης Rayleigh). Ενώ για τις οριακές συνθήκες εδάφους χρησιμοποιούνται φυσικές ή ελεύθερης ολίσθησης.

Για την χαρτογράφηση των προσομοιώσεων με πραγματικά δεδομένα, διατίθενται 4 προβολές, η πολική στερεογραφική (polar stereographic), η σύμμορφη προβολή

¹⁴ Χρήση του WRFRegistry για εισαγωγή επιμέρους μεταβλητών
http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/users_guide_chap8.htm

(Lambert Conformal), η μερκατοριακή (Mercator) και η προβολή γεωγραφικού πλάτους-μήκους (latitude-longitude). Για την περιστροφή της Γης χρησιμοποιούνται όροι της δύναμης Coriolis.

Η θέση του κυρίως πλέγματος είναι σταθερή στο χώρο (static), και δίνεται η δυνατότητα ορισμού ενός ή περισσότερων υποπλεγμάτων σε προκαθορισμένες περιοχές ή πορείες (αν το υποπλέγμα κινείται). Οι πληροφορίες που ανταλλάσσουν μεταξύ τους τα πλέγματα είναι περιορισμένες. Οι κυριότερες είναι οι απαραίτητες οριακές συνθήκες κατόπιν παρεμβολής από τον μητρικό τομέα. Στην περίπτωση του «one-way nesting interactive» η λύση του υποπλέγματος λαμβάνει οριακές συνθήκες από το μητρικό τομέα, αλλά δεν επηρεάζει την λύση του μητρικού τομέα. Στην περίπτωση του «two-way nesting interactive», η ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα στο υποπλέγμα και στον μητρικό τομέα είναι αμφίδρομη. Τα μετεωρολογικά πεδία είναι πλήρως καθορισμένα από τον μητρικό τομέα και τα στατικά από το εκάστοτε υποπλέγμα. Η λύση του υποπλέγματος ανατροφοδοτεί την λύση του μητρικού. Διατίθεται και η επιλογή δημιουργίας κινητών πλεγμάτων στο χώρο (moving nests).

Ο ARW χρησιμοποιεί επίσης διάφορα μοντέλα για τις επιλογές φυσικής και δυναμικής. Έτσι διατίθενται σχήματα μικροφυσικής που ποικίλουν από πολύ απλές περιπτώσεις κατάλληλες για εξιδανικευμένες συνθήκες, έως και πιο εξελιγμένα σχήματα φυσικής κατάλληλα για ερευνητικές μελέτες. Η παραμετροποιήσεις σύννεφων που χρησιμοποιεί ο ARW χρησιμοποιούν σχήματα αναπροσαρμογής και ροής μάζας για μέσης κλίμακας μοντέλα. Η φυσική για την επιφάνεια περιλαμβάνει πολυστρωματικά σχήματα, που κυμαίνονται από απλά θερμικά μοντέλα, σε μοντέλα πλήρους βλάστησης και υγρασίας εδάφους συμπεριλαμβανομένης της κάλυψης χιονιού και πάγου στη θάλασσα. Για το πλανητικό οριακό στρώμα γίνεται χρήση σχημάτων για πρόβλεψη τυρβώδους κινητικής ενέργειας, ή άλλων μη τοπικών Κ σχημάτων. (K schemes). Επίσης η φυσική ακτινοβολίας της ατμόσφαιρας αποτελείται από μεγάλο μήκος και βραχέων κυμάτων συστήματα με πολλαπλές φασματικές ζώνες αλλά και από ένα βραχέων κυμάτων σύστημα κατάλληλο για καιρικές εφαρμογές. Εδώ συνυπολογίζονται οι επιδράσεις των σύννεφων και των επιφανειακών ροών.

3.2.3 Ισχύουσες Εξισώσεις

Ο ARW επιλύει τις πλήρως συμπιεστές, μη υδροστατικές, και μη μόνιμες εξισώσεις Euler. Οι εξισώσεις αυτές τίθεται σε ροή μορφής, χρησιμοποιώντας μεταβλητές που έχουν ιδιότητες διατήρησης και ακολουθούν την φιλοσοφία [Ooyama \(1990\)](#). Σχηματίζονται με τη χρήση μιας μεταβλητής μάζας που ακολουθεί τις υψομετρικές διαφορές της τοπογραφίας και προτάθηκε από τον [Laprise \(1992\)](#). Οι εξισώσεις αυτές επεκτείνονται περαιτέρω με την ενσωμάτωση της υγρασίας.

3.2.3.1 Κάθετες συντεταγμένες και μεταβλητές

Οι ARW εξισώσεις σχηματίζονται χρησιμοποιώντας μια κάθετη μεταβλητή την υδροστατική πίεση που ακολουθεί την τοπογραφία, η οποία υποδηλώνεται με το γράμμα η και ορίζεται ως:

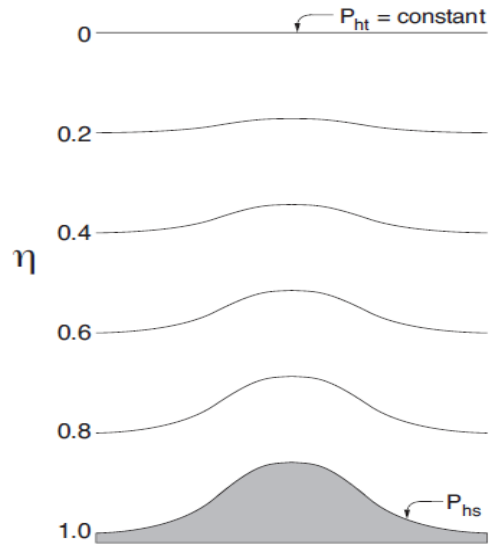
$$\eta = \frac{p_h - p_{ht}}{\mu}, \text{ όπου } \mu = p_{hs} - p_{ht} \quad (3.1)$$

Το p_h είναι η υδροστατική συνιστώσα της πίεσης σε όλο το ύψος του πλέγματος.

Το p_{hs} αναφέρεται στην τιμή της πίεσης κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους.

Το p_{ht} αναφέρεται στην τιμή της πίεσης κατά μήκος των ανώτερων ορίων του υπολογιστικού χώρου.

Η μεταβλητή η ποικίλει, με τιμές από 1 στην επιφάνεια της τοπογραφίας μέχρι και 0 στο ανώτερο όριο του μοντέλου.



Σχήμα 3.1: Καθορισμός της ARW κατακόρυφης μεταβλητής του προβλήματος

Μιας και η μεταβλητή $\mu(x, y)$ αντιπροσωπεύει την μάζα ανά μονάδα επιφάνειας στήλης αέρα ύψους όσο το υπολογιστικό χωρίο, οι αντίστοιχες μορφές των μεταβλητών ροής που σχηματίζονται είναι :

$$V = \mu v = (U, V, W), \quad \Omega = \mu \dot{\eta}, \quad \theta = \mu \theta \quad (3.2)$$

Όπου $v = (u, v, w)$ είναι οι συνναλλοιώτες ταχύτητες στο οριζόντιο (οι δυο πρώτες) και στο κατακόρυφο αντίστοιχα, $\omega = \dot{\eta}$ είναι η ανταλλοιώτη κατακόρυφη ταχύτητα και θ είναι η δυναμική θερμοκρασία.

Στις ισχύουσες αυτές εξισώσεις δεν θα πρέπει να παραλειφθούν οι μεταβλητές:

$\varphi = gz$ που αντιπροσωπεύει το γεωδυναμικό,

η πίεση p και

$a = 1/\rho$ που αναφέρεται στην αντίστροφη πυκνότητα.

Πλέον με την χρήση των παραπάνω μεταβλητών που ορίστηκαν από το στήσιμο ενός μετεωρολογικού προβλήματος για την επίλυση της ροής ρευστού σε κάθε επίπεδο πίεσης της ατμόσφαιρας, οι Euler μετασχηματισμοί συμπεριλαμβανομένου των εξισώσεων ροής μορφής μπορούν να γραφτούν ως:

$$\theta_t U + (\bar{V} \cdot V_u) - \theta_x(p\varphi_\eta) + \theta_\eta(p\varphi_x) = F_U \quad (3.3)$$

$$\theta_t V + (\bar{V} \cdot V_V) - \theta_y(p\varphi_\eta) + \theta_\eta(p\varphi_y) = F_V \quad (3.4)$$

$$\theta_t W + (\bar{V} \cdot V_W) - g(\theta_\eta p - \mu) = F_W \quad (3.5)$$

$$\theta_t \Theta + (\bar{V} \cdot V_\theta) = F_\theta \quad (3.6)$$

$$\theta_t \mu + (\bar{V} \cdot V) = 0 \quad (3.7)$$

$$\theta_t \varphi + \mu^{-1}[(V \cdot \bar{V}_\varphi) - gW] = 0 \quad (3.8)$$

μαζί με την διαγνωστική σχέση της αντίστροφης πυκνότητας:

$$\theta_\eta \varphi = -\alpha \mu \quad (3.9)$$

και την εξίσωση κατάστασης:

$$p = p_0 \left[R_d \theta / p_0 \alpha \right]^\gamma \quad (3.10)$$

Επεξηγήσεις στις παραπάνω εξισώσεις:

1) Οι δείκτες x, y και η υποδηλώνουν διαφόριση στην αντίστοιχη κατεύθυνση.

$$2) \bar{V} \cdot V_\alpha = \theta_x(U_\alpha) + \theta_y(V_\alpha) + \theta_\eta(\Omega_\alpha)$$

$$3) V \cdot \bar{V}_\alpha = U\theta_x a + V\theta_y a + \Omega\theta_\eta a$$

για μια οποιαδήποτε τυχαία μεταβλητή α .

Επίσης:

$\gamma = C_p/C_v = 1.4$ είναι ο λόγος θερμοικών χωρητικοτήτων ξηρού αέρα,

R_d είναι η σταθερά του αερίου για ξηρό αέρα,

p_0 είναι η πίεση αναφοράς με τιμή συνήθως 10^5 Pascal ,

ενώ οι όροι F_U, F_V, F_W , και F_θ του άλλου μέλους αντιπροσωπεύουν όρους εξαναγκασμού που ανακύπτουν από την φυσική του προβλήματος, την τυρβώδη ανάμειξη, την σφαιρική προβολή στον χάρτη και την περιστροφή της Γης.

3.2.3.2 Ενσωμάτωση της υγρασίας

Οι παραπάνω εξισώσεις Euler βρίσκονται στη γενική τους μορφή, καθώς δεν έχει συμπεριληφθεί η υγρασία της ατμόσφαιρας. Από αυτές διατηρούμε τη σύζευξη της ξηρής μάζας του αέρα στις μεταβλητές πρόγνωσης, και διατηρούμε την εξίσωση διατήρησης για τον ξηρό αέρα (2.7), σε αντίθεση με την σύζευξη των μεταβλητών στην πλήρη υγρή μάζα αέρα, και για αυτό τον λόγο εισάγονται όροι πηγής στην εξίσωση διατήρησης μάζας. Επιπλέον ορίζουμε τώρα τις νέες συντεταγμένες σε σχέση με την μάζα ξηρού αέρα. Η κάθετη συντεταγμένη μπορεί τώρα να γραφτεί ως:

$$\eta = \frac{p_{dh} - p_{dht}}{\mu_d} \quad (3.11)$$

Όπου τώρα το μ_d αντιπροσωπεύει την μάζα του ξηρού αέρα εκφρασμένη στη διαφορά των δυο οριακών ξηρών υδροστατικών πιέσεων του μοντέλου, και το p_{dh} την υδροστατική πίεση της ξηρής ατμόσφαιρας σε οποιοδήποτε σημείο του μοντέλου, ενώ το p_{dht} την υδροστατική πίεση του ξηρού αέρα στην κορυφή του μοντέλου.

Έτσι οι μεταβλητές ροής μορφής που σχηματίζονται θα είναι τώρα οι :

$$V = \mu_d v, \quad \Omega = \mu_d \dot{\eta}, \quad \theta = \mu_d \theta \quad (3.12)$$

Οι εξισώσεις Euler με την ενσωμάτωση της υγρασίας γίνονται πλέον :

$$\theta_t U + (\bar{V} \cdot V_u) + \mu_d a \theta_x p + (a/a_d) \theta_\eta p \theta_x \varphi = F_U \quad (3.13)$$

$$\theta_t V + (\bar{V} \cdot V_v) + \mu_d a \theta_y p + (a/a_d) \theta_\eta p \theta_y \varphi = F_v \quad (3.14)$$

$$\theta_t W + (\bar{V} \cdot V_W) - g[(a/a_d) \theta_\eta p - \mu_d] = F_W \quad (3.15)$$

$$\theta_t \theta + (\bar{V} \cdot V_\theta) = F_\theta \quad (3.16)$$

$$\theta_t \mu_d + (\bar{V} \cdot V) = 0 \quad (3.17)$$

$$\theta_t \varphi + \mu d^{-1} [(V \cdot \bar{V}_\varphi) - gW] = 0 \quad (3.18)$$

$$\theta_t Q_m + (\bar{V} \cdot V q_m) = F Q_m \quad (3.19)$$

Και η εξίσωση για την αντίστροφη πυκνότητα είναι τώρα :

$$\theta_\eta \varphi = -\alpha_d \mu_d \quad (3.20)$$

ενώ επίσης η νέα εξίσωση κατάστασης που αναφέρεται πλέον σε όλη την πίεση (ατμός και ξηρός αέρας) θα είναι :

$$p = p_0 \left[R_d \theta_m / p_0 \alpha_d \right]^\gamma \quad (3.21)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις α_d είναι η αντίστροφη πυκνότητα για τον ξηρό αέρα ($1/\rho_d$) ενώ α είναι η πυκνότητα αν λάβουμε υπόψη και άλλες παραμέτρους όπως ατμός, σύννεφο, βροχή, πάγος, δηλαδή: $\alpha = \alpha_d (1 + q_u + q_c + q_r + q_i + \dots)^{-1}$ όπου q_* είναι οι λόγοι ανάμειξης μάζας κατά μάζα ξηρού αέρα, για τα παραπάνω μεγέθη.

Επιπλέον:

$$\theta_m = \theta \left(1 + \left(R_u / R_d \right) q_u \right) \cong \theta (1 + 1.61 q_u) \text{ και}$$

$$Q_m = \mu_d q_m, \quad \mu \varepsilon \quad q_m = q_w, q_c, q_i, \dots$$

3.2.4 Χρονική και Χωρική διακριτοποίηση

3.2.4.1 Χρονική Διακριτοποίηση

Ο ARW επιλυτής χρησιμοποιεί ένα time split μοντέλο χρονικής ολοκλήρωσης για τις εξισώσεις Euler που περιγράφεται από τους [Klemp and Wilhelmson \(1978\)](#) το οποίο αργότερα επεξεργάστηκαν οι [Skamarock and Klemp \(1992\)](#). Οι αργής ή χαμηλής συχνότητας - μετεωρολογικής σημασίας – συνιστώσες ολοκληρώνονται χρησιμοποιώντας ένα 3^{ης} τάξης Runge-Kutta (RK3) σχήμα χρονικής ολοκλήρωσης το οποίο περιγράφεται από τους [Wicker and Skamarock \(2002\)](#), επέκταση των δυο προηγούμενων σχημάτων. Οι υψίσυχνες ακουστικές συχνότητες ολοκληρώνονται υπό μικρότερα χρονικά βήματα έτσι ώστε να διατηρηθεί η αριθμητική ευστάθεια.

Το Runge-Kutta 3^{ης} τάξης σχήμα που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των αργής ή χαμηλής συχνότητας συνιστωσών, στην ουσία ολοκληρώνει μια σειρά από συνήθεις διαφορικές εξισώσεις χρησιμοποιώντας μια κατάλληλη συνάρτηση διόρθωσης. Ορίζοντας την μεταβλητή πρόγνωσης στον ARW ως $\Phi = (U, V, W, \theta, \varphi', \mu', Q_m)$ και τις εξισώσεις του μοντέλου ως $\Phi_t = R(\Phi)$, το 3ης τάξης Runge-Kutta σχήμα ολοκλήρωσης επιλύεται από $\Phi(t)$ σε $\Phi(t + \Delta t)$ μετά από 3 βήματα ως εξής:

$$\Phi^* = \Phi^t + \frac{\Delta t}{3} R(\Phi^t) \quad (3.22)$$

$$\Phi^{**} = \Phi^t + \frac{\Delta t}{2} R(\Phi^*) \quad (3.23)$$

$$\Phi^{t+\Delta t} = \Phi^t + \Delta t R(\Phi^{**}) \quad (3.24)$$

όπου το Δt είναι το χρονικό βήμα για της χαμηλές συχνότητες. Επίσης οι εκθέτες στις παραπάνω εξισώσεις υποδηλώνουν χρονικά βήματα.

Για το χρονικό βήμα ωστόσο πρέπει οπωσδήποτε να λάβουμε υπόψη μας το κριτήριο ευστάθειας των [Courant-Friedrich-Lewy \(1956\)](#), απαραίτητο κριτήριο για την σύγκλιση σε ένα αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού με χρήση μερικών διαφορικών εξισώσεων. Στην γενική του μορφή το κριτήριο μπορεί να αποτυπωθεί ως εξής:

$$C = \Delta t \sum_{i=1}^n \frac{u_{xi}}{\Delta x_i} \leq C_{max} \quad (3.25)$$

Πιο αναλυτικά στο δικό μας 3-διάστατο μετεωρολογικό πρόβλημα ο αριθμός *Courant-Friedrich-Lewy* προκύπτει ως:

$$C = u \frac{\Delta t}{\Delta x} + v \frac{\Delta t}{\Delta y} + w \frac{\Delta t}{\Delta z} \leq C_{max} \quad (3.26)$$

Στην παραπάνω εξίσωση:

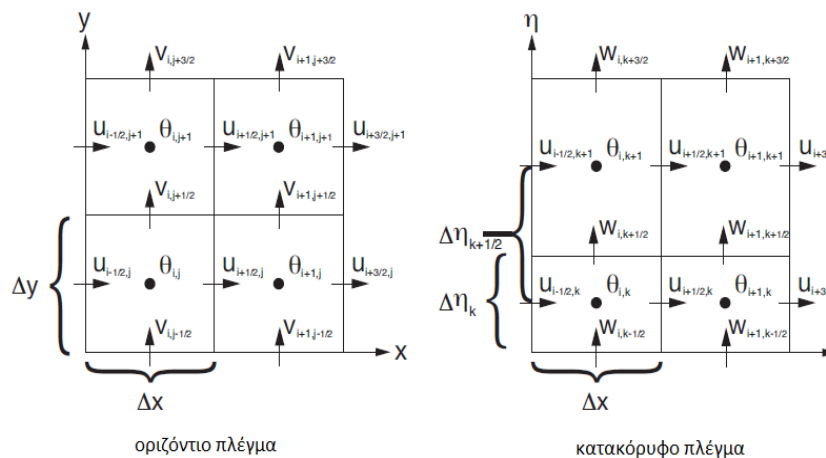
- τα u, v, w (m/s) αντιπροσωπεύουν τα μεγέθη της ταχύτητας και στις 3 διαστάσεις για ένα πλεγματοειδές κελί
- το Δt (sec) είναι το χρονικό βήμα
- το Δx (m) αντιπροσωπεύει το μήκος του εκάστοτε κελιού

Ο αριθμός αυτός δεν θα πρέπει να ξεπερνά έναν μέγιστο αριθμό που ορίζεται στην αρχικοποίηση του προβλήματος και ορίζουμε ως C_{max} , με επιτρεπτές τιμές συνήθως από 1 έως και 1,2. Σε περίπτωση υψηλών ταχυτήτων ανέμου όπου και γίνεται υπέρβαση του C_{max} , η προσομοίωση σταματάει λόγω του κριτηρίου σύγκλισης.

Οι υψίσυχνες αλλά όχι τόσο μετεωρολογικά σημαντικές ακουστικές συχνότητες, θα μείωναν δραματικά το χρονικό βήμα στο 3^{ης} τάξης Runge-Kutta σχήμα. Για να παρακάμψουμε αυτόν τον περιορισμό χρησιμοποιείται μια άλλη προσέγγιση που τις επιλύει. Στην προσέγγιση αυτή ενσωματώνεται επιπλέον μια μορφή διαταραχής στις ισχύουσες εξισώσεις, ενώ επίσης αυξάνεται η ακρίβεια του χρονικού διαχωρισμού καθώς χρησιμοποιούνται μικρότερα χρονικά βήματα που είναι οι αποκλίσεις του πιο πάνω Runge-Kutta σχήματος, τα Φ^t, Φ^* , ή Φ^{**} στις εξισώσεις 3.22 – 3.24.

3.2.4.2 Χωρική Διακριτοποίηση

Για την χωρική διακριτοποίηση στον ARW χρησιμοποιείται ένα τύπου C κλιμακωτό πλέγμα για τις μεταβλητές που φαίνονται στο σχήμα 3.1. Οι κάθετες συνιστώσες της ταχύτητας κατανέμονται σε απόσταση μισού πλεγματού κελιού από τις θερμοδυναμικές μεταβλητές. Οι δείκτες των μεταβλητών (i, j, k) υποδεικνύουν θέσεις με μεταβλητές $(x, y, \eta) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta \eta)$. Τα σημεία όπου βρίσκεται η θ θα είναι τα σημεία κέντρου μάζας και οι τοποθεσίες των μεταβλητών ταχύτητας u, v και w , θα ορίζονται ως u, v και w σημεία αντίστοιχα. Οι μεταβλητές που δεν φαίνονται στο σχήμα αυτό είναι: η μάζα κάθε στήλης μ , ορίζεται στα (i, j) σημεία, το γεωδυναμικό ϕ το οποίο ορίζεται στα w σημεία και οι μεταβλητές υγρασίας q_m , οι οποίες ορίζονται στα σημεία κέντρου μάζας. Οι διαγνωστικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα, δηλαδή η πίεση, και η αντίστροφη πυκνότητα υπολογίζονται στα κέντρα μάζας. Τα μήκη Δx και Δy του πλέγματος είναι σταθερά κατά την διαμόρφωση του μοντέλου, και οποιεσδήποτε αλλαγές στο φυσικό μήκος του πλέγματος σχετίζονται με τις διαφορές σφαιρικές προβολές που χρησιμοποιούμε. Το κατακόρυφο μήκος $\Delta \eta$ του πλέγματος δεν είναι σταθερό, και καθορίζεται κατά την αρχικοποίηση. Μπορούν εύκολα να καθοριστούν οι τιμές των η όπως προαναφέρεται στο 2^ο κεφάλαιο με την σχετική εξίσωση 2.1, έχοντας υπόψη ότι το $\eta = 1$ στην επιφάνεια του πλέγματος, $\eta = 0$ στην κορυφή του πλέγματος και ότι το η μειώνεται μονότονα ανάμεσα στην επιφάνεια και την κορυφή του μοντέλου. Χρησιμοποιώντας αυτούς τους ορισμούς για τις μεταβλητές και το πλέγμα, μπορούμε να επιτύχουμε μια χωρική διακριτοποίηση για τον ARW.



Σχήμα 3.2: Οριζόντιο και κατακόρυφο πλέγμα του ARW.

3.2.5 Αρχικές Συνθήκες

Σε ιδανικές προσομοιώσεις ο χρήστης είναι αυτός που καθορίζει τις αρχικές συνθήκες με τις οποίες θα γίνει η ανάλυση από τον ARW. Στις πραγματικές real-data προσομοιώσεις όμως απαιτείται μια σειρά από ενέργειες μέχρις ότου καθοριστούν οι αρχικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα ο ARW εξαρτάται από ένα άλλο εξωτερικό υπολογιστικό πακέτο το WPS (WRF preprocessor system), το οποίο μετατρέπει τα μεγάλης κλίμακας δεδομένα (Grib δεδομένα) που έχει ο χρήστης σε μορφή κατάλληλη για το ARW. Πιο συγκεκριμένα παρέχονται:

1. δεδομένα εισόδου σωστά κατανεμημένα στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο,
2. τα απαραίτητα πεδία διαταραχής, τα στατικά παιδιά, και τα πεδία καταστάσεως ισορροπίας,
3. άλλα δεδομένα που δίνουν πληροφορίες για την ημερομηνία, τα φυσικά χαρακτηριστικά των πλεγμάτων και λεπτομέρειες για την τοπογραφία.

3.2.5.1 Οριζόντια Παρεμβολή-Χρήση του WPS συστήματος

Το WPS σύστημα αποτελείται από προγράμματα τα οποία παίρνουν ως είσοδο μετεωρολογικά και δεδομένα τοπογραφίας (Grib μορφής). Τα δεδομένα αυτά επεξεργάζονται και μετατρέπονται κατάλληλα για πραγματικές προσομοιώσεις προς τον ARW. Στην αρχή καθορίζουμε μέσω του αρχείου εισόδου namelist.wps ένα φυσικό πλέγμα, συμπεριλαμβανομένου του τύπου προβολής του στον χάρτη, την τοποθεσία του στην Υδρόγειο σφαίρα, τις τοποθεσίες των υποπλεγμάτων του, τον αριθμό των σημείων τους και τις αποστάσεις τους. Περισσότερα για το namelist.wps αρχείο υπάρχουν στο παράρτημα. Έτσι το WPS μέσω του geogrid.exe παρεμβάλλει τα στατικά πεδία για τον προκαθορισμένο τομέα. Στη συνέχεια το WPS μέσω του ungrid.exe αναγνωρίζει τα πεδία αυτά και αναδιαμορφώνει τα Grib δεδομένα που κατέβασε ο χρήστης σε κατάλληλη δυαδική μορφή. Έπειτα το WPS μέσω του metgrid.exe παρεμβάλλει οριζόντια τα επεξεργασμένα μετεωρολογικά δεδομένα, στα προκαθορισμένα πλέγματα. Μέσω του τελευταίου παράγονται τα απαραίτητα αρχεία που αποστέλλονται στον ARW για την συνέχεια της προσομοίωσης.

Τα παραπάνω αρχεία εισόδου στον ARW εμπεριέχουν τρισδιάστατα πεδία, με πληροφορίες για την θερμοκρασία (K), την σχετική υγρασία και τις οριζόντιες συνιστώσες της ορμής. Στα δυσδιάστατα στατικά πεδία που εμπεριέχονται στα αρχεία, περιλαμβάνονται: η ανακλαστικότητα, παράμετροι της Coriolis, η ανύψωση του εδάφους, ο τύπος του εδάφους και της βλάστησης, η κλίμακα στο χάρτη και η γωνία περιστροφής, η υφή του χώματος, οι ετήσια μέση θερμοκρασία και το γεωγραφικό μήκος/πλάτος. Στα διδιάστατα και χρονικά εξαρτώμενα πεδία που προκύπτουν από το WPS, συμπεριλαμβάνονται: η πίεση στο επίπεδο της επιφάνειας της θάλασσας και του εδάφους ($Pascal$), τα θερμοκρασιακά επίπεδα εδάφους (K), η υγρασία εδάφους (kg/kg), το βάθος του χιονιού (m), η θερμοκρασία της θάλασσας (K).

Συνθήκες Αναφοράς: Για προσομοιώσεις πραγματικών δεδομένων, οι συνθήκες αναφορές είναι:

- η ανύψωση του εδάφους,
- η πίεση αναφοράς p_0 στην επιφάνεια της θάλασσας ($10^5 Pascal$)
- η θερμοκρασία T_0 στην επιφάνεια της θάλασσας (από $270K$ ως $300K$)
- η θερμοκρασιακή διαφορά A (μέχρι $50K$) ανάμεσα στα επίπεδα πίεσης της θάλασσας και κορυφής του μοντέλου

Με τη χρήση των παραπάνω παραμέτρων η ξηρή υδροστατική πίεση αναφοράς στην επιφάνεια θα είναι:

$$p_{dhs} = p_0 e^{\left[\left(\frac{-T_0}{A} + \sqrt{\left(\frac{T_0}{A} \right)^2 - \frac{2\phi_s f c}{AR_d}} \right) \right]} \quad (3.27)$$

Ενώ η τριδιάστατη ξηρή υδροστατική πίεση σε κάθε σημείο του μοντέλου θα υπολογίζεται συναρτήσει της κάθετης μεταβλητής των η levels και της ξηρής υδροστατικής πίεσης στην κορυφή του μοντέλου p_{dht} , ως:

$$p_{dh} = \bar{p}_d = \eta(p_{dhs} - p_{dht}) + p_{dht} \quad (3.28)$$

η θερμοκρασία αναφοράς ορίζεται ως:

$$T = T_0 + A \ln \frac{\bar{p}_d}{p_0} \quad (3.29)$$

από αυτά καθορίζεται και η (potential) αύξηση της δυναμικής θερμοκρασίας αναφοράς ως:

$$\bar{\theta}_d = \left(T_0 + A \ln \frac{\bar{p}_d}{p_0} \right) \left(\frac{p_0}{\bar{p}_d} \right)^{\frac{R_d}{c_p}} \quad (3.30)$$

και η πυκνότητα αναφοράς από τις προηγούμενες σχέσεις, ως:

$$\bar{\alpha}_d = \frac{1}{\bar{\rho}_d} = \frac{R_d \bar{\theta}_d}{p_0} \left(\frac{\bar{p}_d}{p_0} \right)^{-\frac{c_v}{c_p}} \quad (3.31)$$

3.2.5.2 Κάθετη παρεμβολή και παρέκταση

Ο ARW επιλυτής χρησιμοποιεί το αρχείο εισόδου `namelist.input` για την ενεργοποίηση των απαιτούμενων μοντέλων φυσικής, τον καθορισμό των χρονικών βημάτων επίλυσης, και άλλες λεπτομέρειες για την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων. Περισσότερα για το αρχείο αυτό υπάρχουν στο παράρτημα. Έπειτα με χρήση του εκτελέσιμου προγράμματος `real.exe`, και συναρτήσεων για την ξηρή υδροστατική πίεση, επιτυγχάνεται η κατακόρυφη παρεμβολή των δεδομένων. Τα δεδομένα εισόδου από το WPS σύστημα, περιλαμβάνουν τα απαραίτητα πεδία συνολικής υδροστατικής πίεσης και της σχετικής υγρασίας. Ξεκινώντας από την κορυφή κάθε στήλης από τα δεδομένα εισόδου της πίεσης, αφαιρείται η υπολογισμένη υγρασία σταδιακά μέχρι και την επιφάνεια. Έπειτα αφαιρούμε από την συνολική πίεση που επικρατεί στην επιφάνεια (p_{sd}), την πίεση στην κορυφή του μοντέλου (p_{dht}), ορίζεται η συνολική ξηρή πίεση του προβλήματος ως:

$$\mu_d = \bar{\mu}_d + \mu'_d = p_{sd} - p_{dht} \quad (3.32)$$

Έτσι πλέον με την κατακόρυφη μεταβλητή η , την πίεση στην κορυφή του μοντέλου και την συνολική ξηρή πίεση σε κάθε (i, j, k) κόμβο, γίνεται η παρεμβολή των τρισδιάστατων πεδίων. Έτσι λοιπόν από την στιγμή που ξεκινά η ελεύθερη τοπογραφίας ατμόσφαιρα μέχρι και την κορυφή του μοντέλου, οι κατακόρυφοι

υπολογισμοί είναι παρεμβολές. Κοντά στην επιφάνεια όμως επικρατεί μια αναντιστοιχία μεταξύ της πίεσης εισόδου, (που βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ανύψωση της επιφάνειας εισόδου), και της πίεσης επιφάνεια που παρέχεται από το ARW σύστημα. Έτσι σαν προεπιλογή οι οριζόντιοι άνεμοι και η σχετική υγρασία κάτω από την επιφάνεια έχουν σταθερές τιμές και με μηδενική κάθετη κλίση. Για την δυναμική θερμοκρασία σαν προεπιλογή χρησιμοποιείται ο κανόνας της κατακόρυφης θερμοβαθμίδας με $-6,5 \text{ K/km}$.

3.2.5.3 Πλευρικές Οριακές Συνθήκες

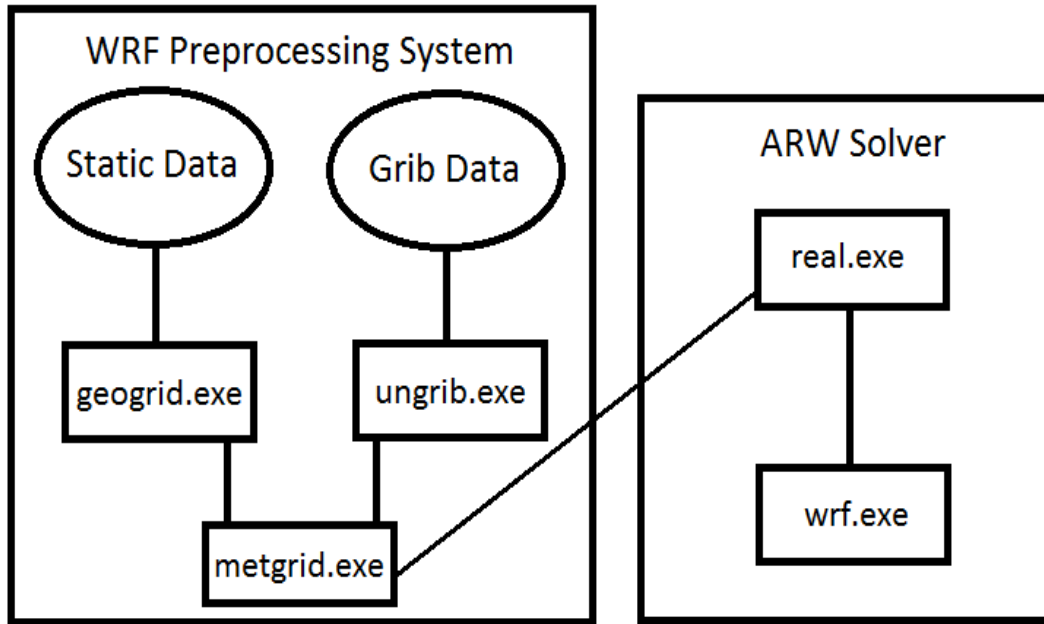
Ο ARW παρέχει επίσης μέσω του εκτελέσιμου προγράμματος real.exe στο WRF σύστημα τις ειδικές οριακές συνθήκες που αφορούν το κύριο πλέγμα του μοντέλου. Για το λόγο αυτό δημιουργεί ένα ειδικά διαμορφωμένο αρχείο (το wrfbdy), το οποίο περιέχει τα απαραίτητα πεδία ταχυτήτων U, V, W , γεωδυναμικού Φ και της συνολικής ξηρής πίεσης μ_d που χρησιμοποιούνται για να περιορίσουν τα πλευρικά όρια. Για κάθε μια από αυτές τις μεταβλητές του αρχείου παρέχονται επίσης μια πραγματική τιμή κατά την αρχικοποίηση των πλευρικών οριακών συνθηκών αλλά έναν όρο τάσης απαραίτητο για την επόμενη χρονική περίοδο. Έτσι για παράδειγμα για την μεταβλητή της ταχύτητας U κατανεμημένη στην x, y και η κατεύθυνση θα είναι για την ώρα $0h$:

$$U_{0h} = \left. \frac{\bar{\mu}_d^x u}{\bar{m}^x} \right|_{0h} \quad \text{και επίσης} \quad U_{3h} = \left. \frac{\bar{\mu}_d^x u}{\bar{m}^x} \right|_{3h} \quad (3.33)$$

Και έτσι ο όρος τάσης προκύπτει ως:

$$U_t = \frac{U_{3h} - U_{0h}}{3h} \quad (3.34)$$

,όπου πλέον θα αντικαταστήσει την αρχική τιμή στον κόμβο του πλέγματος με αυτήν του νέου όρο για τις επόμενες 3 ώρες προσομοίωσης. Με αυτόν τον τρόπο καθορίζεται το κάθε πεδίο πλευρικών οριακών συνθηκών κατά μήκος των τεσσάρων σημείων του ορθογωνίου πλέγματος.



Σχήμα 3.3: Απεικόνιση της ροής του λογισμικού WRF και των συνιστωσών του, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο το υποσύστημα WPS δίνει τα δεδομένα στον ARW επιλυτή. Στα ορθογώνια σχήματα φαίνονται τα ονόματα των εκτελέσιμων προγραμμάτων.

Στο Σχήμα 3.3 απεικονίζεται η ροή εκτέλεσης των εντολών του λογισμικού WRF και των υποσυστημάτων αυτού. Το εκτελέσιμο `geogrid.exe`, καθορίζει τα πλέγματα και δημιουργεί τα στατικά πεδία από την τοπογραφία. Το εκτελέσιμο `ungrib.exe`, αποκωδικοποιεί τα μετεωρολογικά Grib δεδομένα. Το εκτελέσιμο `metgrid.exe`, παρεμβάλλει οριζόντια τα μετεωρολογικά δεδομένα στα καθορισμένα πλέγματα. Το εκτελέσιμο `real.exe`, παρεμβάλλει κάθετα τα αρχεία από το WPS και δημιουργεί τις οριακές συνθήκες. Το εκτελέσιμο `wrf.exe`, παράγει την τελική πρόγνωση του μοντέλου.

3.2.6 Χρήση υποπλεγμάτων

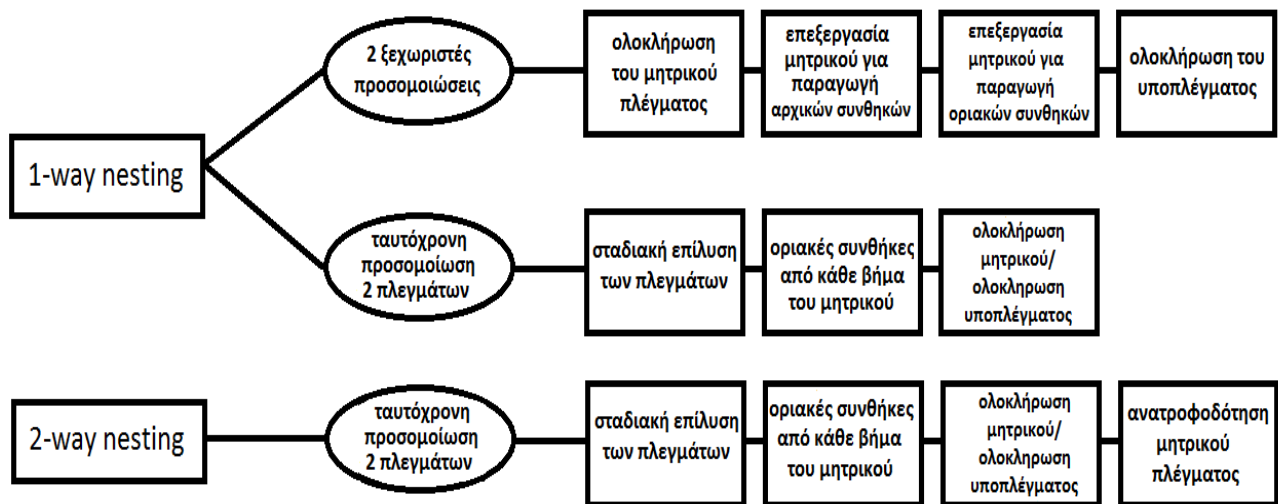
Το ARW σύστημα υποστηρίζει λειτουργία χρήσης υποπλεγμάτων στην οριζόντια κατεύθυνση με υψηλότερη ανάλυση από αυτήν των μητρικών τους πλεγμάτων. Έτσι μπορούν να εισάγονται στην προσομοίωση επιπλέον πλέγματα, πλήρως καθορισμένου ορθογώνιου σχήματος και γεωγραφικού μήκους/πλάτους, που να βρίσκονται απαραίτητα στο εσωτερικό των κυρίων πλεγμάτων τους. Ο τρόπος με τον οποίο ορίζονται είναι παρόμοιος με αυτόν πολλών άλλων λογισμικών για πρόγνωση καιρού μεσοκλίμακας όπως COAMPS, MM5, ARPS κλπ. Υπερτερεί αυτών στο γεγονός ότι η προσομοίωση των επιπλέον πλεγμάτων γίνεται σε πολλούς επεξεργαστές ενός υπολογιστικού συστήματος, καθώς επίσης και στο γεγονός ότι υποστηρίζεται και μια λειτουργία για χρήση κινητού πλέγματος στο χώρο.

3.2.6.1 Επιλογές υποπλεγμάτων (“one/two way nesting”)

Οι προσομοιώσεις με υποπλέγματα μπορούν να πραγματοποιηθούν με δυο επιλογές, είτε με το “one way nesting” που αντιστοιχεί σε (feedback=0), είτε με το “two way nesting” που αντιστοιχεί σε (feedback=1). Οι επιλογές αυτές αναφέρονται στον τρόπο με τον οποίο το μητρικό πλέγμα επιδρά στο υποπλέγμα του και αντίστροφα. Και στις δυο μεθόδους, οι οριακές συνθήκες του υποπλέγματος (όπως για παράδειγμα οι πλευρικές), είναι απευθείας παρεμβολές που προκύπτουν από την πρόγνωση του κυρίως πλέγματος. Στο “one way nesting” αυτή είναι και η μόνη πληροφορία που ανταλλάσσουν μεταξύ τους τα δυο πλέγματα (από το μητρικό στο υποπλέγμα). Αντιθέτως στο “two way nesting” η λύση που προκύπτει από το υποπλέγμα έρχεται να αντικαταστήσει αυτήν του μητρικού πλέγματος, για τα κελιά εκείνα του μητρικού που βρίσκονται εντός του υποπλέγματος. Έτσι διπλή πληροφορία ανταλλάσσεται μεταξύ των πλεγμάτων. Για αυτό και ονομάζεται “two way nesting”.

Το “one way nesting” στην WRF προσομοίωση πραγματοποιείται με δυο τρόπους. Στον πρώτο τρόπο, ολοκληρώνεται η προσομοίωση για το μητρικό πλέγμα, κατόπι

παράγονται οι απαραίτητες αρχικές και οριακές συνθήκες του υποπλέγματος και εν συνεχεία ολοκληρώνεται η πρόγνωση του υποπλέγματος. Στον δεύτερο τρόπο έχουμε ταυτόχρονη προσομοίωση και των δυο πλεγμάτων. Οι οριακές συνθήκες του υποπλέγματος παράγονται σε κάθε χρονικό βήμα του μητρικού, κατόπιν ολοκληρώνεται πρώτα το μητρικό πλέγμα και μετά το υποπλέγμα, στο ίδιο χρονικό βήμα. Η διαφορά με το “two way nesting” όπως αναφέρεται και παραπάνω είναι ότι η τελευταία λύση του υποπλέγματος, αντικαθιστά αυτήν του μητρικού.



Σχήμα 3.4: Επεξήγηση των ξεχωριστών μεθόδων “one way” και “two way nesting” σε μια WRF προσομοίωση. Σχηματική απεικόνιση των διαφορών υποπεριπτώσεων όπως αναφέρονται παραπάνω.

3.2.6.2 Εισαγωγή των αρχικών και οριακών συνθηκών του υποπλέγματος

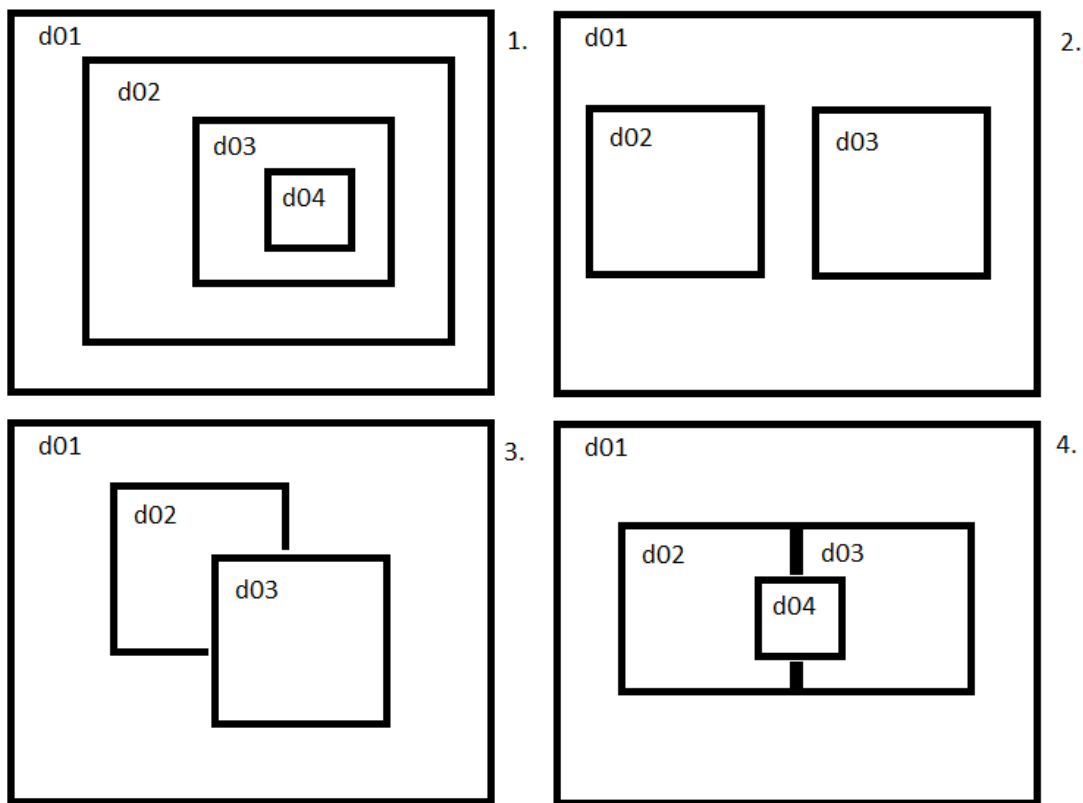
Για την περίπτωση των ταυτόχρονων τρεξιμάτων είτε “one way” είτε “two way nesting” υπάρχουν οι παρακάτω επιλογές εισόδου των αρχικών μεταβλητών πρόγνωσης του υποπλέγματος:

- όλες οι μεταβλητές υποπλέγματος (είτε τα στατικά, είτε τα μετεωρολογικά πεδία), προκύπτουν από παρεμβολές του μητρικού πλέγματος
- όλες οι μεταβλητές του υποπλέγματος θα εισαχθούν από ένα άλλο εξωτερικό αρχείο του συστήματος, το οποίο εμπεριέχει πληροφορία υψηλότερης ανάλυσης για τα στατικά και μετεωρολογικά πεδία
- ορισμένες μεταβλητές θα προκύπτουν με παρεμβολές από το μητρικό πλέγμα ενώ άλλες υψηλότερης ανάλυσης θα παρέχονται στο υποπλέγμα πάλι από κάποιο εξωτερικό αρχείο.

3.2.6.3 Πιθανές θέσεις των υποπλεγμάτων στο χώρο

Ένα πλέγμα της WRF προσομοίωσης μπορεί να περιέχει όχι μόνο ένα αλλά 2 ή και περισσότερα εσωτερικά πλέγματα. Κάθε πλέγμα πρέπει να βρίσκεται ολόκληρο εντός του μητρικού του, όπως και κάθε επόμενο υποπλέγμα αυτού. Έτσι ένα υποπλέγμα μπορεί να είναι μητρικό για κάθε επόμενο που βρίσκεται στο εσωτερικό του κοκ. Αυτός είναι ο πρώτος τρόπος καθορισμού των θέσεων για διάφορα πλέγματα. Μια άλλη πιθανή είναι η περίπτωση όπου δυο διαφορετικά πλέγματα βρίσκονται εντός του μητρικού τους, ανεξάρτητα μεταξύ τους και είναι εξίσου αποδεκτή. Δεν επιτρέπεται όμως ένα υποπλέγμα να καλύπτει σημεία κάποιου άλλου ή να έχει παραπάνω από ένα μητρικό πλέγμα στο ίδιο επίπεδο.

Είτε πρόκειται για “one way” είτε “two way nesting”, ο λόγος αναλογίας της οριζόντιας απόστασης του μητρικού πλέγματος προς την απόσταση του υποπλέγματος, πρέπει να είναι ακέραιος αριθμός (χωρική αναλογία δυο πλεγμάτων $\Delta x_{coarse}/\Delta x_{child}$). Το ίδιο ισχύει και για τον λόγο των χρονικών βημάτων τους (χρονική αναλογία δυο πλεγμάτων $\Delta t_{coarse}/\Delta t_{child}$). Οι λόγοι χωρικής και χρονικής αναλογίας θα πρέπει να ταυτίζονται στην WRF προσομοίωση.



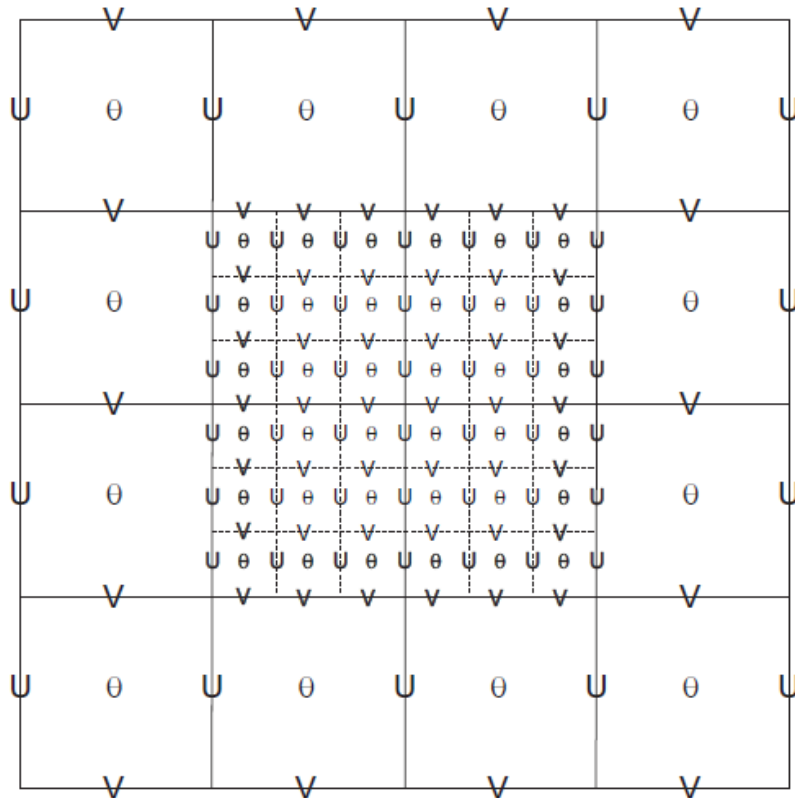
Σχήμα 3.5: Απεικόνιση των πιθανών θέσεων των υποπλεγμάτων στον χώρο. Οι περιπτώσεις 1. και 2. αναφέρονται στις επιτρεπτές χωροθετήσεις πλεγμάτων. Στην περίπτωση 3. δεν επιτρέπεται η επικάλυψη πλέγματος από άλλο, ενώ στην 4. δεν μπορεί ένα πλέγμα(d04) να έχει δυο διαφορετικά μητρικά πλέγματα(d02 και d03).

3.2.6.4 Καθορισμός των μεταβλητών των πλεγμάτων στο χώρο.

Ανατροφοδότηση πλέγματος

Ο ARW όπως έχουμε αναφέρει χρησιμοποιεί ένα τύπου C κλιμακωτό πλέγμα. Οι u και v συνιστώσες της ταχύτητας, είναι κάθετες σε σχέση με την επιφάνεια του κελιού, ενώ η μάζα, τα θερμοδυναμικά, τα βαθμωτά μεγέθη και άλλες χημικές μεταβλητές, βρίσκονται στο κέντρο του εκάστοτε κελιού. Το κάθε πλέγμα έχει μια επιπλέον στήλη για τις ταχύτητες u στην x κατεύθυνση, και μια επιπλέον γραμμή ταχυτήτων v στην y κατεύθυνση, για να οριστούν με αυτόν τον τρόπο τα όρια του πλέγματος. Οι οριζόντιες συνιστώσες της ορμής ανακλούν ένα μέσο όρο για κάθε επιφάνεια (πλευρά) του κελιού, ενώ αντίθετα μια μεταβλητή μάζας, ένα θερμοδυναμικό, χημικό ή βαθμωτό μέγεθος αφορά μια αντιπροσωπευτική μέση

τιμή κατά μήκος του κελιού. Με την ανατροφοδότηση από το υποπλέγμα στον μητρικό τομέα, διατηρούνται στην ουσία αυτές οι μέσες τιμές. Τα θερμοδυναμικά, βαθμωτά, χημικά, και τα πεδία μάζας, τροφοδοτούνται ως μέσοι όροι σε όλο το μητρικό πλέγμα, όπως επίσης σαν μέσοι όροι επιστρέφουν και οι οριζόντιες συνιστώσες της ορμής, κατά μήκος κάθε πλευράς κελιού του μητρικού.



Σχήμα 3.6: Αλληλεπίδραση ενός μητρικού και ενός ενσωματωμένου υποπλέγματος με αναλογία 3:1. Οι υπολογιζόμενες τιμές των μεταβλητών επιστρέφουν στον μητρικό τομέα ως μέσοι όροι με τον τρόπο που αναφέρεται παραπάνω.

3.2.6.5 Δημιουργία του υποπλέγματος

Το κάθε υποπλέγμα της WRF προσομοίωσης αρχικοποιείται εντός χρονικού βήματος του μητρικού πλέγματος, κάτι που ισχύει για όλα τα εσωτερικά πλέγματα ενός τομέα. Για να καταχωρηθούν σωστά τα μετεωρολογικά πεδία, καλείται μια κατάλληλη υπορουτίνα αρχικοποίησης, που κάνει οριζόντια παρεμβολή των δεδομένων του μητρικού πλέγματος στις τοποθεσίες του υποπλέγματος. Είναι μια

μονότονη συνάρτηση που χρησιμοποιείται για όλα σχεδόν τα πεδία, είτε τα μετεωρολογικά, της τοπογραφίας ή και οι πλευρικές οριακές συνθήκες, σχήμα των (Smolarkiewicz and Grell, 1992).

Πίνακας 3.2: Διαδικασία δημιουργίας των πλεγμάτων μιας WRF προσομοίωσης

Ολοκλήρωση του μητρικού πλέγματος σε ένα χρονικό βήμα
Χρόνος έναρξης του υποπλέγματος
1) Οριζόντια παρεμβολή δεδομένων στο υποπλέγμα
2) Εισαγωγή υψηλής ανάλυσης δεδομένων τοπογραφίας στο υποπλέγμα
3) Υπολογισμός εξισώσεων κατάστασης υποπλέγματος
4) Ανατροφοδότηση αρχικών συνθηκών στο μητρικό πλέγμα
5) Υπολογισμός νέων εξισώσεων κατάστασης μητρικού πλέγματος
Περάτωση χρόνου έναρξης υποπλέγματος
Επίλυση χρονικού βήματος για το μητρικό πλέγμα (επίλυση εξισώσεων Euler 3 ^{ου} κεφαλαίου)
Αν υπάρχουν και άλλα πλέγματα για ολοκλήρωση
1) Απόδοση πλευρικών οριακών συνθηκών από το νέο μητρικό στο υποπλέγμα
2) Ολοκλήρωση του νέου υποπλέγματος στο χρονικό βήμα του μητρικού του
3) Ανατροφοδότηση της πληροφορίας στο μητρικό πλέγμα
Ολοκλήρωση των υπολοίπων πλεγμάτων
Ολοκλήρωση υπολογισμού του δικτύου πλεγμάτων

3.2.6.6 Ανατροφοδότηση και Εξομάλυνση

Για να επικρατεί συνέπεια στα σημεία που συμπίπτουν ο μητρικός τομέας με το υποπλέγμα οι τιμές του υποπλέγματος ανατροφοδοτούνται πίσω στον μητρικό τομέα. Η λειτουργία αυτή καλείται “feedback option” και ισοδυναμεί με το “two way nesting”. Οι τιμές αυτές επιστρέφουν είτε σαν μέσοι όροι, βάσει των κελιών του υποπλέγματος, ή επιλέγεται ένα μόνο σημείο που επιστρέφει. Πιο συγκεκριμένα, ο μηχανισμός της ανατροφοδότησης χρησιμοποιεί τους μέσους όρους του συνόλου των κελιών για ποσότητες που αφορούν μάζα, και άλλα θερμοδυναμικά, βαθμωτά, και χημικά μεγέθη, ενώ χρησιμοποιεί για τις οριζόντιες συνιστώσες της ορμής ένα μέσο όρο για κάθε επιφάνεια (πλευρά) του κελιού.

Μετά την ανατροφοδότηση, οι τιμές αυτές μπορούν επίσης να εξομαλυνθούν στην περιοχή του υποπλέγματος (smooth option). Οι επιλογές αυτές του feedback και smooth option δεν επηρεάζουν τις γραμμές και στήλες που παρέχουν τις συνοριακές συνθήκες από το κυρίως πλέγμα στο υποπλέγμα. Σκοπός είναι η ομαλοποίηση των εσωτερικών αντικατεστημένων γραμμών και στηλών του μητρικού πλέγματος, αναλογικά και με την τοπογραφία του. Έγινε χρήση 2 ομαλοποιητών, του 1-2-1 smoother 5 σημείων και του smoother-desmoother.

Στις προσομοιώσεις που έγιναν χρησιμοποιήθηκε ένα δοκιμαστικό πλέγμα για την κατανόηση της συμπεριφοράς και της αλληλεπίδρασης των πλεγμάτων με ή χωρίς ανατροφοδοτήσεις (feedback options), και με ή χωρίς επιλογές ομαλοποίησης (smooth options). Περισσότερα για τις δυο επιλογές αυτές υπάρχουν και στο τεχνικό εγχειρίδιο της 3^{ης} έκδοσης του WRF λογισμικού¹⁵.

¹⁵A Description of the Advanced Research WRF Version 3 και ο αντίστοιχος σύνδεσμος http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf

3.2.7 Μοντέλα Φυσικής

Οι κατηγορίες μοντέλων φυσικής στην WRF προσομοίωση είναι:

- 1) η μικροφυσική
- 2) η παραμετροποίηση των σύννεφων
- 3) η φυσική που αφορά το πλανητικό-οριακό-επιφανειακό στρώμα
- 4) η φυσική της επιφάνειας
- 5) η ακτινοβολία της ατμόσφαιρας

Για την ενσωμάτωση των μοντέλων φυσικής στον ARW επιλυτή, υπάρχουν δυο ξεχωριστές υπορουτίνες. Η μια προετοιμάζει τα μοντέλα φυσικής που θα χρησιμοποιηθούν, και η άλλη τροποποιεί τις τάσεις των υπολογισμένων πεδίων. Η προετοιμασία των μοντέλων φυσικής εμπεριέχει στην ουσία την πλήρωση πινάκων με μεταβλητές όπως θερμοκρασία, πίεση, υψομετρικές διαφορές επιπέδων πίεσης, πάχη στρώματος ατμόσφαιρας και εδάφους, και άλλες είτε στο μέσο του εκάστοτε κελιού, είτε σε όλη την επιφάνειά του. Τα μοντέλα φυσικής γενικά υπολογίζουν τάσεις για τις ταχύτητες, την ενδεχόμενη θερμοκρασία, και τα επίπεδα υγρασίας. Έπειτα η άλλη υπορουτίνα θα κάνει σύζευξη αυτών των τάσεων με τις κατάλληλες συντεταγμένες και τις κατάλληλες μεταβλητές για τον ARW.

Κατά την διάρκεια του πρώτου βήματος της Runge-Kutta, πριν τα ακουστικά βήματα, (βλ. 3^ο κεφάλαιο χρονική και χωρική διακριτοποίηση), υπολογίζονται οι τάσεις για την ακτινοβολία, και τα μοντέλα φυσικής της επιφάνειας, του οριακού στρώματος, και της παραμετροποίησης των σύννεφων. Οι τάσεις αυτές διατηρούνται σταθερές σε όλη την διάρκεια επίλυσης των Runge-Kutta βημάτων. Αντίθετα τα μοντέλα μικροφυσικής υπολογίζονται μετά από το τελευταίο βήμα της Runge-Kutta, προκειμένου να διατηρηθούν οι κατάλληλες συνθήκες κορεσμού της ατμόσφαιρας στο τέλος του χρονικού βήματος.

3.2.7.1 Επιλογές Μικροφυσικής

Η μικροφυσική περιλαμβάνει όλες τις διεργασίες νερού/ατμού, σύννεφων και φαινομένων καθίζησης. Στα μοντέλα χρησιμοποιούνται συνήθως μεταβλητές 4^{ων} διαστάσεων, οι τρεις εκ των οποίων είναι οι χωρικοί δείκτες και η τελευταία

προσδιορίζει το είδος της μεταβλητής. Η λογική του να υπολογίζονται τα μεγέθη που αφορούν την συμπύκνωση στο τελευταίο βήμα της Runge-Kutta, διασφαλίζει ότι η τελική κατάσταση κορεσμού της ατμόσφαιρας είναι ακριβής για την δυναμική θερμοκρασία και την υγρασία. Επίσης οι διαδικασίες καθίζησης που υπολογίζονται εδώ επιβάλλουν ένα σχετικά μικρό χρονικό βήμα στον κώδικα. Με αυτό τον τρόπο θα αποφευχθούν οι οποιεσδήποτε αστάθειες υπολογισμού των κάθετων ροών καθίζησης. Στα μοντέλα αυτά συμπεριλαμβάνονται και διεργασίες πάγου ή διεργασίες μικτής φάσης. Οι διεργασίες μικτής φάσης έχουν να κάνουν με την αλληλεπίδραση σωματιδίων πάγου και νερού, όπως χιονόνερο, χαλάζι κλπ.

Στην WRF προσομοίωση χρησιμοποιήσαμε το **WRF Single-Moment 3-class (WSM3) σχήμα**. Ακολουθεί το σχήμα [Hong et al. \(2004\)](#) και περιλαμβάνει κατακρήμνιση πάγου και άλλες παραμετροποιήσεις στις φάσεις πάγου. Η βασική διαφορά με πολλά άλλα μοντέλα μικροφυσικής είναι ότι χρησιμοποιείται μια διαγνωστική σχέση για την συγκέντρωση πάγου, που βασίζεται στην περιεκτικότητα κατά μάζα σε πάγο και όχι στην θερμοκρασία. Το WSM3 μπορεί να προγνώσει 3^{ων} κατηγοριών υδρομετέωρα: ατμό, συμπυκνώματα νερού/πάγου, και συμπυκνώματα βροχής/χιονιού, και γι' αυτό το λόγο καλείται απλό μοντέλο πάγου. Ακολουθεί το σχήμα του [Dudhia \(1989\)](#) στο να υπολογίζει συμπυκνώματα νερού και βροχής για θερμοκρασίες μεγαλύτερες του μηδενός, και πάγου ή χιονιού για τις πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες. Το WSM3 είναι υπολογιστικά επαρκές για τις παραπάνω διαδικασίες.

3.2.7.2 Παραμετροποίηση των σύννεφων

Τα μοντέλα αυτά παραμετροποίησης έχουν να κάνουν με τις επιπτώσεις που έχει στην WRF προσομοίωση η ύπαρξη των πυκνών σύννεφων καθ' ύψος της ατμόσφαιρας. Επί της ουσίας αντιπροσωπεύουν τις κάθετες ροές που προκύπτουν από ανοδικά ή καθοδικά ρεύματα ενώ αντισταθμίζουν τις κινήσεις αυτές έξω από τα σύννεφα. Ορισμένα από αυτά παρέχουν επίσης τάσεις για τα επαγωγικά σύννεφα και τα πεδία καθίζησης, ενώ σχεδόν όλα παρέχουν τις συνιστώσες συναγωγής θερμότητας στις επιφάνειες βροχόπτωσης. Οι παραμετροποιήσεις αυτές γίνονται κυρίως για πλέγματα με μήκος κελιού μεγαλύτερο από αυτό των

5 – 10 km , όπου είναι απαραίτητο να απελευθερωθεί σωστά η λανθάνουσα θερμότητα, και σε ρεαλιστική κλίμακα χρόνου.

Πιο συγκεκριμένα στην WRF προσομοίωση για τα 2 μεγαλύτερα πλέγματα χρησιμοποιήθηκε το **Kain-Fritsch σχήμα** (Kain, 2004) . Το σχήμα αυτό ακολουθεί τις εξισώσεις Kain and Fritsch (1990) και Kain and Fritsch (1993), αλλά έχει τροποποιηθεί με βάση τις δοκιμές που έγιναν εντός του Eta-Model. Χρησιμοποιεί απλή μοντελοποίηση σύννεφων με υγρά ανοδικά και καθοδικά ρεύματα συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων από την ανάμειξη τυρβώδους ροής υδρατμών (εντός επαγωγικού σύννεφου), με ροή αέρα εκτός αυτού (entrainment) και αντιστρόφως (detrainment) , και από τα μοντέλα μικροφυσικής. Διαφέρει από τα δυο προηγούμενα σχήματα, στο ότι:

→Επιβάλλεται ένα ελάχιστο ποσοστό τυρβώδους ανάμειξης (entrainment rate), σε περίπτωση ασταθούς ξηρής ατμόσφαιρας.

→Από την θερμοκρασία βάσης του σύννεφου καθορίζεται το ελάχιστο βάθος που γίνεται συναγωγή θερμότητας σε ανοδικά ρεύματα.

→Για τα καθοδικά ρεύματα:

- Πηγή τους αποτελεί το βαθύ στρώμα των 150-200 mb πάνω από την βάση του νέφους

- Η ροή μάζας ορίζεται σαν ποσοστό της ανοδικής ροής μάζας στη βάση του νέφους

- Η τυρβώδης ανάμειξη του αέρα ενός σύννεφου από τον αέρα της ατμόσφαιρας θα γίνεται στην κορυφή του ανοδικού ρεύματος και προς τα κάτω.

3.2.7.3 Φυσική του πλανητικού-οριακού-επιφανειακού στρώματος

Τα μοντέλα φυσικής του πλανητικού οριακού στρώματος (Planetary Boundary Layer), είναι αυτά που θα καθορίσουν τις κάθετες ροές, οι οποίες θα προκύψουν από τις διαταραχές ταχυτήτων, τις λεγόμενες eddy velocities. Γενικά οι ταχύτητες αυτές προκύπτουν από αφαίρεση της μέσης ταχύτητας ενός ρευστού από τη στιγμιαία του ταχύτητα σε ένα σημείο. Τα PBL μοντέλα καθορίζουν την μορφή του

προφίλ στο καλά αναμεμειγμένο οριακό στρώμα, παρέχοντας τις ατμοσφαιρικές τάσεις της υγρασίας, της οριζόντιας ορμής και της θερμοκρασίας, (συμπεριλαμβανομένων και των νεφών).

Στην WRF προσομοίωση χρησιμοποιείται το **Yonsei University (YSU) PBL scheme**. Το σχήμα αυτό περιγράφηκε από τους (Hong et al., 2006) και αποτελεί επόμενη γενιά του MRF PBL scheme (Hong and Pan, 1996), που χρησιμοποιεί όρους αντίθετης κλίσης που αντιπροσωπεύουν ροές μη τοπικών διαβαθμίσεων. Η κορυφή του YSU PBL μοντέλου καθορίζεται βάσει μηδενικού κρίσιμου αριθμού Bulk Richardson σε σχέση με το MRF PBL που έχει τιμή 0,5. Έτσι εξαρτάται αποκλειστικά από το προφίλ άνωσης, όπου η κορυφή του πλανητικού οριακού στρώματος καθορίζεται πλέον στο σημείο όπου η ανάμειξη τυρβώδους ροής υδρατμών είναι μέγιστη και όχι μηδενική. Με τον τρόπο αυτό παράγεται ένα καλά αναμειγμένο προφίλ οριακού στρώματος με μια πιο σταθερή δομή.

Τα μοντέλα φυσικής του επιφανειακού στρώματος, υπολογίζουν ταχύτητες τριβής και τους απαραίτητους συντελεστές ανταλλαγής, για τον υπολογισμό της θερμοότητας της επιφάνειας και των ροών υγρασίας από τα μοντέλα της επιφάνειας του εδάφους που υπεισέρχονται στα μοντέλα πλανητικού οριακού στρώματος. Πάνω από υδάτινες επιφάνειες όμως οι επιφανειακές ροές και τα διαγνωστικά πεδία υπολογίζονται από τα ίδια τα μοντέλα του επιφανειακού στρώματος.

Στην WRF προσομοίωση χρησιμοποιείται η **Similarity theory (MM5)**. Το σχήμα αυτό χρησιμοποιεί συναρτήσεις ευστάθειας, από τους Paulson (1970), Dyer and Hicks (1970), και Webb (1970) για να υπολογίσει τους επιφανειακούς συντελεστές για θερμοότητα, υγρασία και ορμή. Μια επαγωγική ταχύτητα που ακολουθεί το σχήμα του Beljaars (1994), χρησιμοποιείται για να βελτιώσει αυτές τις επιφανειακές ροές θερμοότητας και υγρασίας. Στο συγκεκριμένο σχήμα δεν επιβάλλεται θερμοκή παραμετροποίηση του μήκους τραχύτητας.

3.2.7.4 Φυσική της επιφάνειας

Τα μοντέλα αυτά φυσικής χρησιμοποιούν όλη την ατμοσφαιρική πληροφορία από τα μοντέλα επιφανειακού στρώματος, ακτινοβολίας, καθίζησης από τα μοντέλα μικροφυσικής, και παραμετροποίησης των σύννεφων, σε συνδυασμό με την

κατηγορία εδάφους πάνω από κάθε χωρίο του πλέγματος (είτε στεριά είτε θάλασσα) έτσι ώστε να τους παρέχουν τις απαραίτητες ροές θερμότητας και υγρασίας.

Στην WRF προσομοίωση χρησιμοποιείται το **Noah Land Surface Model**. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε από την NCAR και NCEP, περιγράφηκε από τους [Chen and Dudhia \(2001\)](#). Είναι κατάλληλο για επιχειρησιακή λειτουργία και έρευνα, και εφαρμόζεται σε πολλά μοντέλα πρόγνωσης της μεσοκλίμακας. Αποτελείται από 4 θερμοκρασιακά επίπεδα εδάφους, και 4 επίπεδα υγρασίας, με εφαρμογή θόλου υγρασίας και πρόβλεψη χιονόστρωσης. Τα 4 επίπεδα είναι στα 10, 30, 60, και 100 cm από την κορυφή προς τα κάτω. Περιλαμβάνει πληροφορίες για την εξατμισιοδιαπνοή, την ξηρασία του εδάφους και την απορροή, ενώ επίσης λαμβάνει υπόψη του διάφορες κατηγορίες βλάστησης και υφής του εδάφους και προβλέπει τον πάγο στο έδαφος, ενώ παρέχει ροές θερμότητας στα μοντέλα πλανητικού οριακού στρώματος.

Σε συνδυασμό με το **Noah Land Surface Model** στην WRF προσομοίωση ενεργοποιείται η επιλογή του πρότυπου αστικού θόλου **Urban Canopy Model**, με σκοπό την βελτίωση των προγνώσεων του κώδικα σε αστικές περιοχές όπως την περιοχή της Κοζάνης και της Αθήνας, όπου γίνεται πύκνωση του πλέγματος. Το **UCM** αναπτύχθηκε από τους [Kusaka et al. \(2001\)](#) και [Kusaka and Kimura \(2004\)](#) και αργότερα τροποποιήθηκε από τους [Chen et al. \(2006\)](#).

Το πρότυπο αστικού θόλου Urban Canopy Model περιλαμβάνει:

→ Παραμετροποίηση των δρόμων και αστικών οδών ώστε να αντιπροσωπεύεται έτσι η αστική γεωμετρία.

→ Υπολογισμός των σκιάσεων και αντανάκλασεων από τα κτίρια.

→ Επιβολή ενός εκθετικού προφίλ ανέμου σε όλο τον αστικό θόλο.

→ Πολυστρωματικές εξισώσεις θερμότητας για επιφάνειες οροφών, τοίχων και του οδοστρώματος.

Υπολογίζει επίσης την ανταλλαγή ορμής ανάμεσα στην αστική επιφάνεια και την ατμόσφαιρα, ενώ λαμβάνει υπόψη του 3 διαφορετικές κατηγορίες αστικής ανάπτυξης.

3.2.7.5 Φυσική ακτινοβολίας της ατμόσφαιρας

Τα μοντέλα ακτινοβολίας παρέχουν πληροφορία για την ατμοσφαιρική θερμότητα, που προκύπτει από την απόκλιση της ηλιακής ακτινοβολίας από την επιφάνεια, είτε την μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας, είτε μικρού μήκους κύματος, που χρειάζονται για τον ισολογισμό της θερμότητας στο έδαφος. Η μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία περιλαμβάνει υπεριώδη ή θερμική ακτινοβολία που απορροφάται και εκπέμπεται από τα αέρια και τις επιφάνειες. Οι ακτινοβολίες μικρού μήκους κύματος, που αφορούν την ορατή ακτινοβολία, συνθέτουν το ηλιακό φάσμα. Έτσι η μόνη πηγή είναι ο ήλιος, αλλά οι διεργασίες συμπεριλαμβάνουν απορρόφηση, ανάκλαση και σκέδαση στις επιφάνειες της ατμόσφαιρας.

Στην WRF προσομοίωση χρησιμοποιείται το **Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) Longwave**. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στο σχήμα [Mlawer et al. \(1997\)](#), εμπεριέχει ένα σύστημα φασματικής ζώνης που χρησιμοποιεί την λεγόμενη k συσχέτιση. Στην ουσία χρησιμοποιεί προκαθορισμένα τραπέζια που αντιπροσωπεύουν με ακρίβεια τις διεργασίες μεγάλου μήκους κύματος, λόγω υδρατμών, και στοιχείων όπως το Όζον, το CO₂, ίχνη από άλλα αέρια όπως επίσης και τις επιρροές από τα σύννεφα.

Στην WRF προσομοίωση χρησιμοποιείται το **MM5 Shortwave**. Το σχήμα αυτό βασίζεται στον [Dudhia \(1989\)](#). Γίνεται μια απλή ενσωμάτωση της ηλιακής ροής που αντιπροσωπεύει τις σκεδάσεις του αέρα, απορρόφησης υδρατμών και ανακλαστικότητα των σύννεφων, με επιπλέον επιπτώσεις των σκιάσεων στην επιφάνεια ηλιακών ροών.

Κεφάλαιο 4 . Εφαρμογή Αριθμητικής Μεθοδολογίας

4.1 Τρεξίματα που έγιναν, με ποιον σκοπό, πως οδηγηθήκαμε

Αρχικά έγινε εκμάθηση του λογισμικού WRF μέσα από tutorials που υπήρχαν διαθέσιμα στο site του μοντέλου. Αφορούσαν απλές μελέτες περιπτώσεων για την Αμερική. Η πρώτη αφορούσε χιονοθύελλα κατηγορίας 3 που έγινε στις 24-25 Ιανουαρίου στην Βορειοανατολικές ακτές των ΗΠΑ, συνοδευόταν από χαμηλό βαρομετρικό πάνω από την τοποθεσία με ανέμους της τάξης των 60mph και μέγιστη χιονόπτωση από 51 – 76cm. Η δεύτερη μελέτη περίπτωσης αφορούσε τον γνωστό τυφώνα Katrina κατηγορίας 5 που συνέβη στις 28 Αυγούστου του 2005 στον κόλπο του Mexico επηρεάζοντας τις νοτιοανατολικές ΗΠΑ, όπως την Νότια Φλόριντα, τις Μπαχάμες, την Λουϊζιάνα, την Ν. Ορλεάνη, την Αλαμπάμα, με χαμηλό βαρομετρικό στα 902 mbar και ανέμους της τάξης των 175 mph . Η τρίτη περίπτωση αφορούσε την εκμάθηση της χρήσης υποπλεγμάτων για την περίπτωση του τυφώνα Katrina. Για τις δυο πρώτες περιπτώσεις εφαρμόστηκε πλέγμα με οριζόντια ανάλυση $dx = 30.000km$ και $dy = 30.000km$, ενώ στην τρίτη περίπτωση εφαρμόστηκε υποπλέγμα αναλογίας 1 ÷ 3 με χωρική ανάλυση $dx = 10.000km$ και $dy = 10.000km$.

Έπειτα αφού διαπιστώθηκε η έγκυρη λειτουργία από την ορθότητα των μετρήσεων του μετεωρολογικού ιστού, και έγινε η εξοικείωση με το λογισμικό μελετώντας τα αποτελέσματα από τις παραπάνω περιπτώσεις, κρίθηκε αναγκαίο το στήσιμο αριθμητικού πλέγματος για πραγματοποίηση των συγκρίσεων στις περιοχές ενδιαφέροντος. Πιο συγκεκριμένα στήθηκαν 3 διαφορετικά πλέγματα. Το πρώτο πλέγμα αφορά μελέτη της συμπεριφοράς και αλληλεπίδρασης των υποπλεγμάτων για την Αττική και σε γεωγραφικό πλάτος, μήκος 37.97453, 23.76828. Έπειτα έχοντας πειραματικά δεδομένα για τις 9 Φεβρουαρίου 2014 και 9 Αυγούστου 2014, από προηγούμενη μελέτη που έγινε στην περιοχή της Κοζάνης, δημιουργήσαμε καινούριο πλέγμα σε γεωγραφικό πλάτος, μήκος 40.3002635, 21.800083, με σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων του λογισμικού WRF με τις μετρήσεις αυτές. Το τρίτο πλέγμα αφορά πάλι την περιοχή της Αττικής στο ίδιο γεωγραφικό πλάτος, μήκος 37.97453, 23.76828, για σύγκριση με τις μετρήσεις που δίνει ο δικός μας μετεωρολογικός σταθμός.

Setup_1

Για την περιοχή της Αττικής έγινε μια πρώτη μελέτη παραμετρικής ευαισθησίας όσον αφορά τις επιλογές ανατροφοδότησης και εξομάλυνσης (feedback option, smooth option), προκειμένου να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά των πλεγμάτων και να διαπιστωθούν οι αλληλεπιδράσεις τους με την ενεργοποίηση ή όχι των παραπάνω επιλογών. Οι προσομοιώσεις αυτές δίνουν απαντήσεις για το αν έχει νόημα ή όχι η χρήση τους σε επόμενα βήματα. Αφορούν προγνώσεις του λογισμικού για τις 5 Οκτωβρίου 2015.

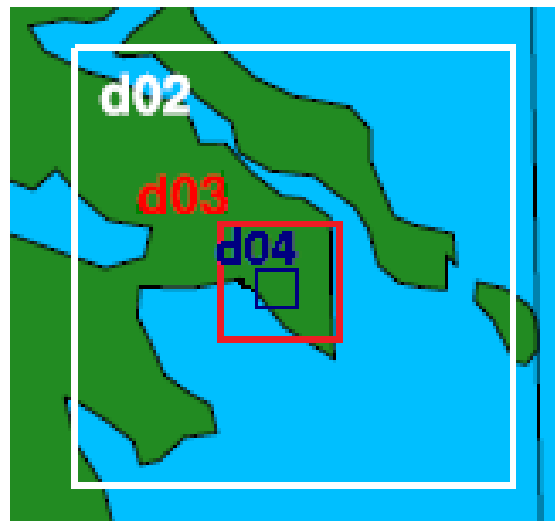
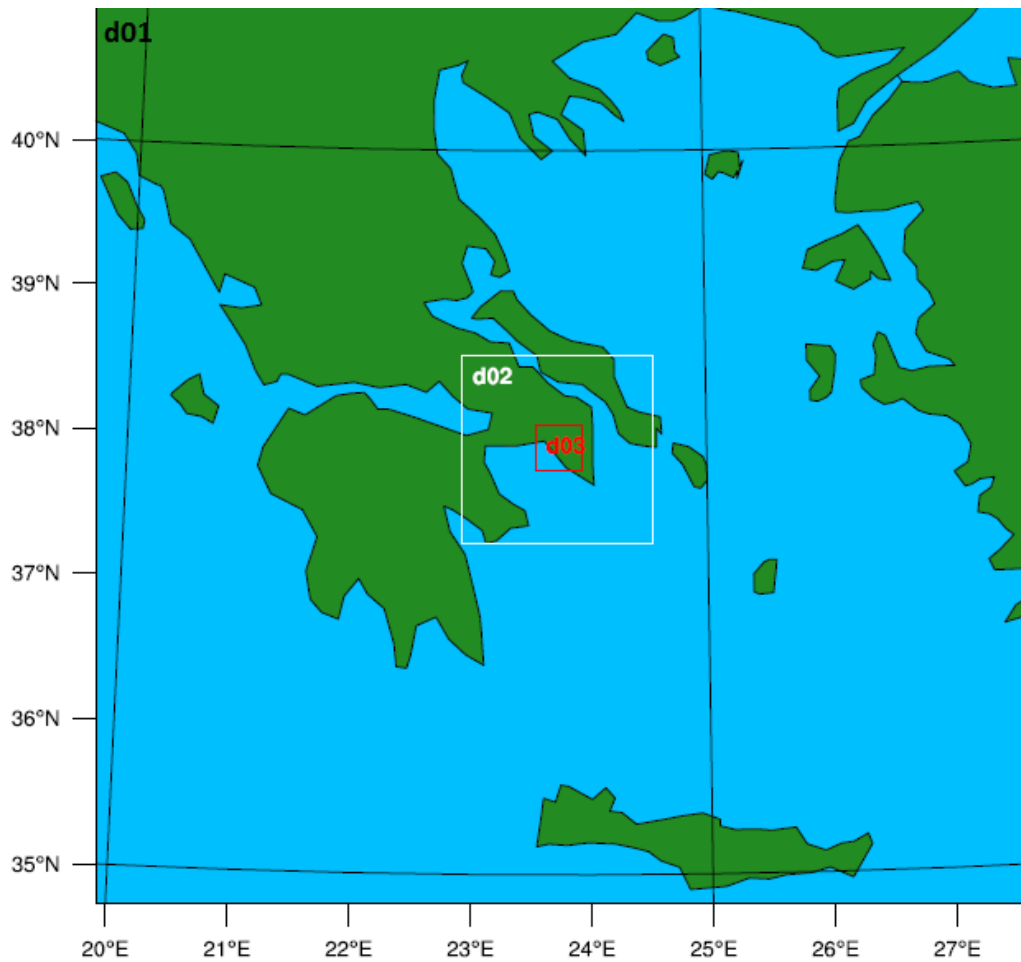
Το πρώτο πλέγμα που καθορίστηκε προς εξέταση περιελάμβανε ένα μητρικό (d01) και τρία υποπλέγματα (d02,3,4) με τα παρακάτω ειδικά χαρακτηριστικά

Πίνακας 4.1: Πλέγμα προσομοιώσεων Οκτωβρίου 2015

Setup_1	d01	d02	d03	d04
dx(km)	10	2	0,5	0,25
dy(km)	10	2	0,5	0,25
dt(sec)	60	12	3	1,5
we_nodes	70	71	69	61
sn_nodes	70	71	69	61
eta_levels	45	45	45	45

Όπου we_nodes, sn_nodes είναι ο αριθμός των κόμβων σε κάθε πλέγμα, οι οποίοι βρίσκονται σε αποστάσεις dx, dy αντίστοιχα. Επίσης eta_levels είναι ο αριθμός των κόμβων στη κατακόρυφη κατεύθυνση.

Το παραπάνω πλέγμα είναι δοκιμαστικό και δεν χρησιμοποιήθηκε στις επόμενες προσομοιώσεις. Τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης δεν θα συγκριθούν με άλλα πειραματικά καθώς ο μετεωρολογικός ιστός δεν είχε εγκατασταθεί.



Σχήμα 4.1.1: Απεικόνιση της θέσης του κυρίως πλέγματος d01 και των υποπλεγμάτων του d0(2,3,4) με πύκνωση στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής, της Αθήνας και της Πολυτεχνειούπολης, για τις προσομοιώσεις του Setup_1

Setup_2

Αύγουστος 2014

Για την περιοχή της Κοζάνης και για τις 9 Αυγούστου 2014, έχοντας πλέον διατηρήσει την επιλογή του “feedback option” που ισοδυναμεί με το “two way nesting” ενεργοποιημένη από τις προηγούμενες προσομοιώσεις, δημιουργείται πλέγμα για πραγματοποίηση των απαραίτητων συγκρίσεων με τις διαθέσιμες μετρήσεις. Τα τρεξίματα που έγιναν εδώ αφορούν και επιπλέον σύγκριση των μετρήσεων, με χρήση ή όχι του πρότυπου αστικού θόλου Urban Canopy Model. Τα μετεωρολογικά πειραματικά δεδομένα στην Κοζάνη λαμβάνονται μέχρι και σε ύψος 650m περίπου από το έδαφος. Για το λόγο αυτό έχουν γίνει διαγράμματα θερμοκρασιών και ταχυτήτων στα πρώτα σημεία που διατίθενται μετρήσεις από το σταθμό αλλά και σε όλο το ύψος μέχρι και τα 650m. Οι προσομοιώσεις έγιναν έχοντας τις οριακές συνθήκες 2 προηγούμενων ημερών {2 days spin up}, σε δυο διαφορετικούς επεξεργαστές του λογισμικού τον WRFV3.5 και τον WRFV3.7, διότι όσο γινόταν η διπλωματική βγήκε η έκδοση 3.7 και έγινε η μετάβαση στη νέα έκδοση του κώδικα. Επίσης με τον WRFV3.7 επιτυγχάνεται υψηλότερη ανάλυση σε ότι αφορά το κάθετο στρώμα για τα επίπεδα πίεσης (πυκνότερα eta_levels), χρησιμοποιώντας 3 πλέγματα αντί για 4. Στους Πίνακες 4.2 και 4.3 φαίνονται τα σχετικά πεδία που αποδίδουν τις παραμέτρους των πλεγμάτων, και τις χωρικές και χρονικές αναλύσεις τους με τους αντίστοιχους κόμβους.

Πίνακας 4.2: Πλέγμα προσομοιώσεων Αυγούστου 2014 στον WRFV3.5

Setup_2 WRFV3.5	d01	d02	d03	d04
dx(km)	12	6	1,5	0,5
dy(km)	12	6	1,5	0,5
dt(sec)	35	17,5	4,375	1,45
we_nodes	75	31	33	31
sn_nodes	75	31	33	31
eta_levels	45	45	45	45

Πίνακας 4.3: Πλέγμα προσομοιώσεων Αυγούστου 2014 στον WRFV3.7

Setup_2 WRFV3.7	d01	d02	d03
dx(km)	12	6	1,5
dy(km)	12	6	1,5
dt(sec)	30	15	3,75
we_nodes	75	31	33
sn_nodes	75	31	33
eta_levels	45	45	45

Όπου we_nodes, sn_nodes είναι ο αριθμός των κόμβων σε κάθε πλέγμα, οι οποίοι βρίσκονται σε αποστάσεις dx, dy αντίστοιχα. Επίσης eta_levels είναι ο αριθμός των κόμβων στη κατακόρυφη κατεύθυνση.

Πίνακας 4.4: Κατανομή των πρώτων 10 eta levels για τον Αύγουστο

Αύγουστος									
WRFV3.5	time step(sec)				WRFV3.7	time step(sec)			
eta_levels (m)	d01	d02	d03	d04	eta_levels (m)	d01	d02	d03	d04
12.30	35.00	17.50	4.38	1.45	15.50	30.00	15.00	3.75	
51.00	/				34.40	/			
99.00					51.80				
138.00					77.00				
198.00					102.00				
278.00					154.00				
358.00					243.00				
439.00					341.00				
519.00					440.00				
599.00					538.00				
680.00					637.00				

Φεβρουάριος 2014

Για την ίδια περιοχή στην Κοζάνη αλλά για τις 9 Φεβρουαρίου 2014 έγιναν οι ίδιες προσομοιώσεις σε ότι αφορά την σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με ή χωρίς χρήση του πρότυπου αστικού θόλου Urban Canopy Model. Και εδώ έγινε χρήση του WRFV3.7 επεξεργαστή εκτός του WRFV3.5, για τον ίδιο λόγο. Από αυτές τις συγκρίσεις, οι αποκλίσεις που προκύπτουν στις χρονοσειρές των θερμοκρασιών μας οδηγούν σε επιπλέον προσομοιώσεις που έχουν να κάνουν με την χρήση οριακών συνθηκών από το site της GFS. Πιο συγκεκριμένα έγινε σύγκριση μεταξύ τριών διαφορετικών προσομοιώσεων. Στην πρώτη έχοντας GFS δεδομένα για την ίδια μέρα στις 9/2 {no_spin up}, στην δεύτερη έχοντας δεδομένα για την προηγούμενη μέρα στις 8/2 {1 day spin up}, και στην 3 έχοντας τις οριακές συνθήκες 2 προηγούμενων ημερών {2 days spin up}. Παρακάτω βρίσκονται και τα στοιχεία για τα πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις αυτές, στα οποία παρουσιάζονται και οι χωρικές και χρονικές αναλύσεις με τους αντίστοιχους κόμβους.

Πίνακας 4.5: Πλέγμα συγκρίσεων των πειραματικών μετρήσεων με ή χωρίς την χρήση του πρότυπου αστικού θόλου στον WRFV3.5 επεξεργαστή.

Setup_2 WRFV3.5	d01	d02	d03	d04
dx(km)	12	6	1,5	0,5
dy(km)	12	6	1,5	0,5
dt(sec)	35	17,5	4,375	1,45
we_nodes	75	31	33	31
sn_nodes	75	31	33	31
eta_levels	45	45	45	45

Πίνακας 4.6: Πλέγματα συγκρίσεων λόγω διαφορετικής αφετηρίας των υπολογισμών με χρήση οριακών συνθηκών της ίδιας μέρας no_spin up, 1^{ος} μέρας 1 day spin up και 2 μερών, 2 days spin up στον WRFV3.7

Setup_2 WRFV3.7 no spin up	d01	d02	d03
dx(km)	12	6	1,5
dy(km)	12	6	1,5
dt(sec)	25	12,5	3,12
we_nodes	75	31	33
sn_nodes	75	31	33
eta_levels	45	45	45

Setup_2 WRFV3.7 1 day spin up	d01	d02	d03
dx(km)	12	6	1,5
dy(km)	12	6	1,5
dt(sec)	25	12,5	3,12
we_nodes	75	31	33
sn_nodes	75	31	33
eta_levels	45	45	45

Setup_2 WRFV3.7 2 days spin up	d01	d02	d03
dx(km)	12	6	1,5
dy(km)	12	6	1,5
dt(sec)	30	15	3,75
we_nodes	75	31	33
sn_nodes	75	31	33
eta_levels	45	45	45

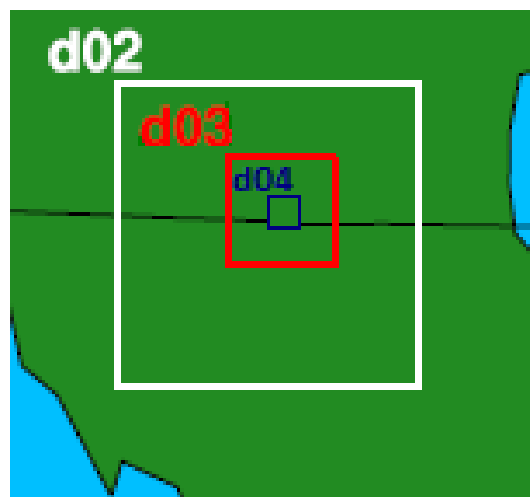
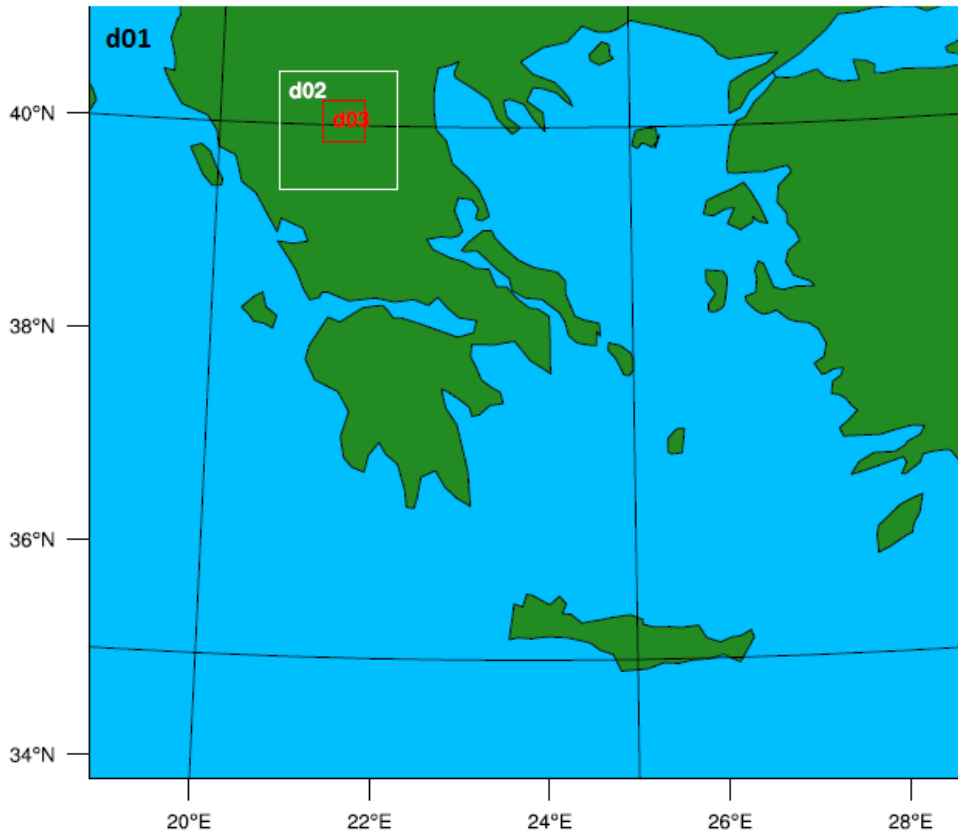
Πίνακας 4.8: Πλέγμα λογισμικού TAPM, που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις Αυγούστου και Φεβρουαρίου του 2014 στην Κοζάνη

Tapm	d01	d02	d03	d04	d05
dx(km)	30	10	3	1	0,3
dy(km)	30	10	3	1	0,3
we_nodes	21	21	21	21	21
sn_nodes	21	21	21	21	21
eta_levels	45	45	45	45	45

Όπου we_nodes, sn_nodes είναι ο αριθμός των κόμβων σε κάθε πλέγμα, οι οποίοι βρίσκονται σε αποστάσεις dx, dy αντίστοιχα. Επίσης eta_levels είναι ο αριθμός των κόμβων στη κατακόρυφη κατεύθυνση.

Πίνακας 4.7: Κατανομή των 10 πρώτων περίπου eta levels για τις προσομοιώσεις του Φεβρουαρίου

WRFV3.5	WRFV3.7
eta_levels (m)	eta_levels (m)
11.60	14.70
50.00	32.00
95.00	48.00
132.00	73.00
189.00	96.00
264.00	145.00
340.00	229.00
416.00	321.00
493.00	413.00
568.00	506.00
645.00	598.00



Σχήμα 4.1.2: Απεικόνιση της θέσης του κυρίως πλέγματος d01 και των υποπλεγμάτων του d0(2,3,4) με πύκνωση στην ευρύτερη περιοχή της πόλης της Κοζάνης, για τις προσομοιώσεις του Setup_2

Setup_3

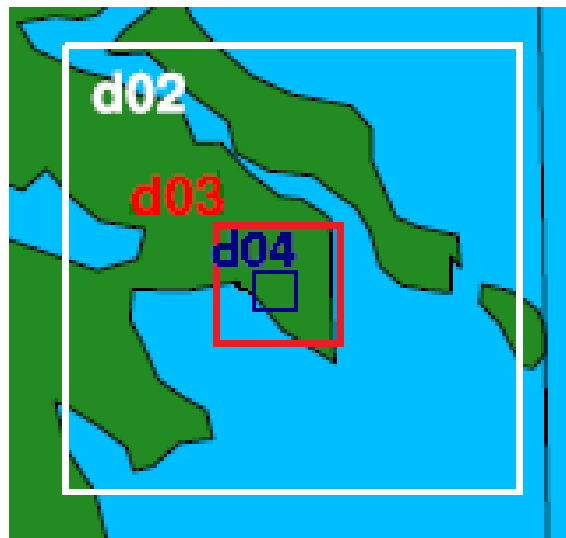
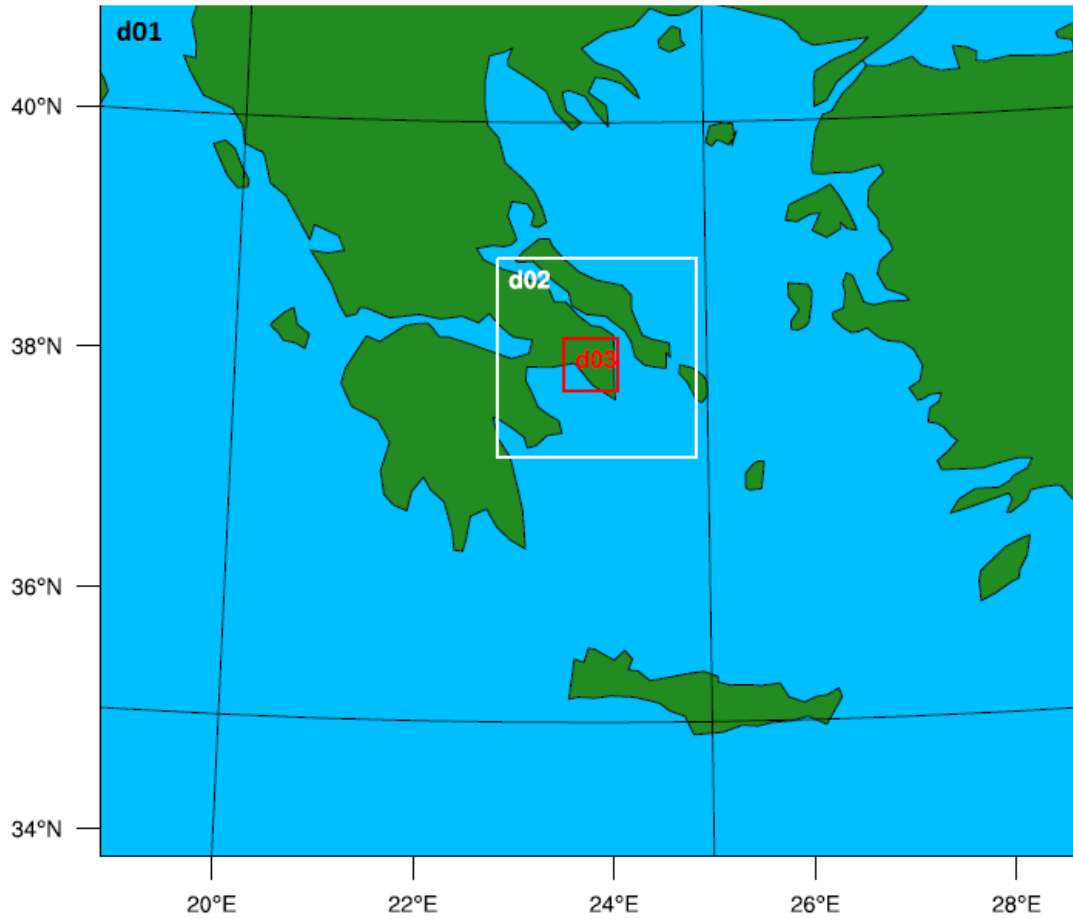
Για την περιοχή της Αττικής έχοντας πλέον και τα πειραματικά δεδομένα που μας δίνει ο μετεωρολογικός σταθμός δημιουργείται πλέγμα που έχει ίδια χαρακτηριστικά με το πλέγμα της Κοζάνης όσον αφορά τις χωρικές, χρονικές αναλύσεις και τους κόμβους. Το συγκεκριμένο πλέγμα τρέχει επιχειρησιακά κάνοντας 48ωρη πρόγνωση 2 φορές την ημέρα. Τα μεγέθη του πλέγματος παρουσιάζονται παρακάτω.

Πίνακας 4.9: Πλέγμα Αττικής που επιλύεται επιχειρησιακά

Setup_3 WRFV3.7	d01	d02	d03	d04
dx(km)	12	6	1,5	0,5
dy(km)	12	6	1,5	0,5
dt(sec)	30	15	3,75	1,25
we_nodes	75	31	33	31
sn_nodes	75	31	33	31
eta_levels	45	45	45	45

Όπου we_nodes, sn_nodes είναι ο αριθμός των κόμβων σε κάθε πλέγμα, οι οποίοι βρίσκονται σε αποστάσεις dx, dy αντίστοιχα. Επίσης eta_levels είναι ο αριθμός των κόμβων στη κατακόρυφη κατεύθυνση.

Για τις προσομοιώσεις στην Αττική δεν έχει γίνει κάποια κατανομή στο κατακόρυφο στρώμα και χρησιμοποιούνται 4 πλέγματα.



Σχήμα 4.1.3: Απεικόνιση της θέσης του κυρίως πλέγματος d01 και των υποπλεγμάτων του d0(2,3,4) με πύκνωση στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής, της Αθήνας και της Πολυτεχνειούπολης, για τις προσομοιώσεις του Setup_3

4.2 Επιπλέον βοηθητικά λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν

Η ανάγκη αποτύπωσης των αποτελεσμάτων σε διαγράμματα ώστε να φαίνονται με σαφήνεια οι χρονοσειρές και να γίνονται ευκολότερες οι συγκρίσεις με τις διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις, οδηγεί στην εκμάθηση και χρήση επιπλέον λογισμικών εκτός του WRF. Παρακάτω παρουσιάζονται σύντομες περιγραφές των λογισμικών αυτών, ο λόγος και η σειρά υλοποίησής τους, καθώς και ο τρόπος σύνδεσης με το λογισμικό WRF.

NCL

Αρχικά έγινε εκμάθηση της γλώσσας προγραμματισμού NCL¹⁶, ένα υπολογιστικό εργαλείο της NCAR¹⁷. Η NCL είναι κατάλληλη γλώσσα σχεδιασμένη ειδικά για επεξεργασία, ανάλυση και απεικόνιση επιστημονικών δεδομένων. Επεξεργάζεται αρχεία τύπου NETCDF 3/4, GRIB 1/2, HDF 4/5, ASCII και δυαδικής μορφής.

Συνδέεται άμεσα με το λογισμικό WRF καθώς υπάρχουν διαθέσιμες εντολές στις βιβλιοθήκες της, που χειρίζονται κατάλληλα τα δεδομένα εισόδου από μια WRF προσομοίωση. Ήταν ο ιδανικότερος τρόπος επεξεργασίας αυτών των δεδομένων λόγω της NETCDF μορφής τους. Σκοπός ήταν η δημιουργία των *.txt αρχείων που ενδεικτικά περιλαμβάνουν τα απαραίτητα μεγέθη θερμοκρασιών, ταχυτήτων ανέμου, τις χρονικές μεταβολές τους στις 3 κατευθύνσεις κλπ.

GNU PLOT

Η δημιουργία των διαγραμμάτων μέσω των *.txt αρχείων αποτελεί και το τελευταίο στάδιο για την σύγκριση των προσομοιώσεων είτε με είτε χωρίς τις μετρήσεις. Το GNU PLOT¹⁸ ήταν το κατάλληλο υπολογιστικό εργαλείο για την επεξεργασία αρχείων σε ASCII μορφή. Το λογισμικό αναπτύχθηκε το 1986 και χρησιμοποιείται σε LINUX, OS2, MS WINDOWS και πολλές άλλες πλατφόρμες. Αρχικά δημιουργήθηκε επιτρέποντας στους επιστήμονες και φοιτητές να απεικονίσουν

¹⁶ NCL: NCAR Command Language <https://www.ncl.ucar.edu/>

¹⁷ NCAR : National Center for Atmospheric Research <https://ncar.ucar.edu/>

¹⁸ Gnuplot : <http://www.gnuplot.info/>

μαθηματικές συναρτήσεις με απλές εντολές η μια κάτω από την άλλη. Πλέον γίνεται απεικόνιση πολυπαραμετρικών συναρτήσεων και σύγκριση πολλών γραφικών παραστάσεων στο ίδιο διάγραμμα.

Bash Script

Η ανάγκη αυτοματοποίησης των διαδικασιών μιας προσομοίωσης μας οδήγησε στην δημιουργία ενός script αυτοματοποίησης γραμμένο σε bash γλώσσα προγραμματισμού. Γενικά Bash¹⁹ είναι ο φλοιός που έχει αναπτυχθεί από το λεγόμενο GNU Project²⁰ το 1983. Ενσωματώνει χρήσιμα χαρακτηριστικά του φλοιού Korn (ksh) και του φλοιού C (csh). Ακολουθεί το πρότυπο IEEE POSIX P1003.2 / ISO 9945.2 για φλοιούς και χρήσιμα υπολογιστικά εργαλεία. Χρησιμοποιείται για προγραμματισμό και εκτέλεση σειριακών εντολών. Τα περισσότερα Bash scripts μπορούν να εκτελεστούν από τον φλοιό Bash χωρίς τροποποίηση.

Το script που χρησιμοποιείται πλέον εκτελεί τις απαραίτητες εντολές για την ολοκλήρωση μιας WRF προσομοίωσης με απεικόνιση και των αποτελεσμάτων της. Αρχικά έχοντας σαν είσοδο τα απαραίτητα δεδομένα συστήματος, ώρα και ημερομηνία, επεξεργάζεται τα αρχεία εισόδου namelist.wps και namelist.input αλλά και όλα τα αρχεία που θα χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία των *.txt και των τελικών απεικονίσεων. Έπειτα κατεβάζει τις GFS οριακές συνθήκες και εκτελεί σειριακά τις εντολές του WRF λογισμικού όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.3 στο 3^ο κεφάλαιο. Μετά την προσομοίωση δημιουργεί τα απαραίτητα αρχεία και βάσει αυτών τα διαγράμματα για τις συγκρίσεις. Το script αυτό, καλείται από το σύστημα 2 φορές την ημέρα και κάνει πρόγνωση για τις επόμενες 48 ώρες.

Οι κώδικες και κάποιες επιπλέον λεπτομέρειες και επεξηγήσεις για τα παραπάνω λογισμικά βρίσκονται στο Παράρτημα Α.

¹⁹ Bash : Bourne Again Shell https://en.wikipedia.org/wiki/Bash_%28Unix_shell%29

²⁰ Gnu project : https://en.wikipedia.org/wiki/GNU_Project

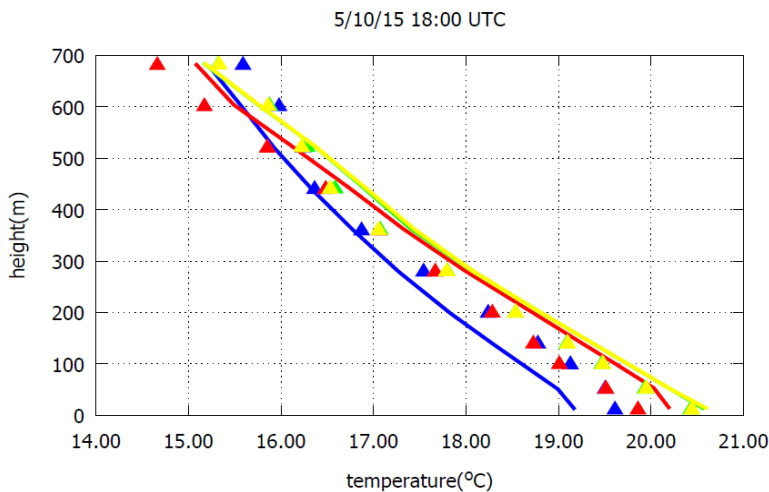
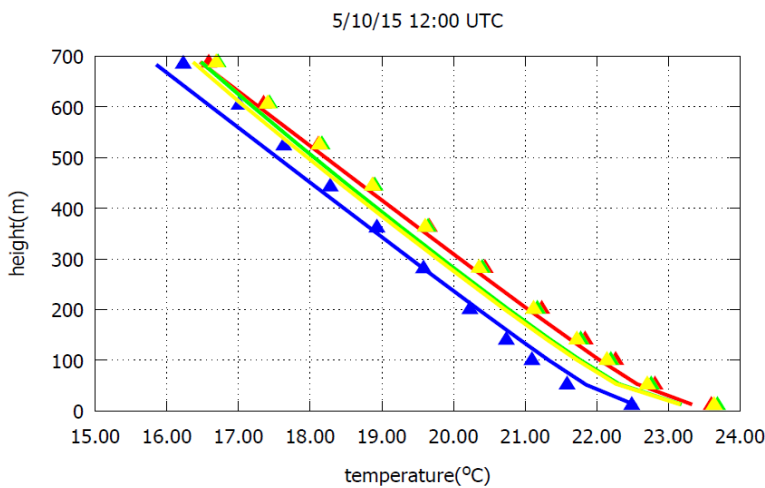
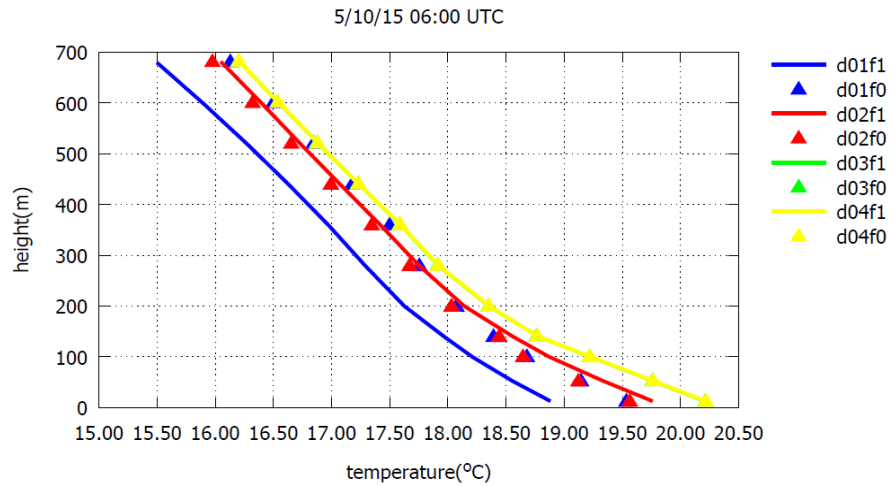
Κεφάλαιο 5 . Αποτελέσματα

5.1 Περίπτωση Αθήνας (Setup_1) 5-10-2015

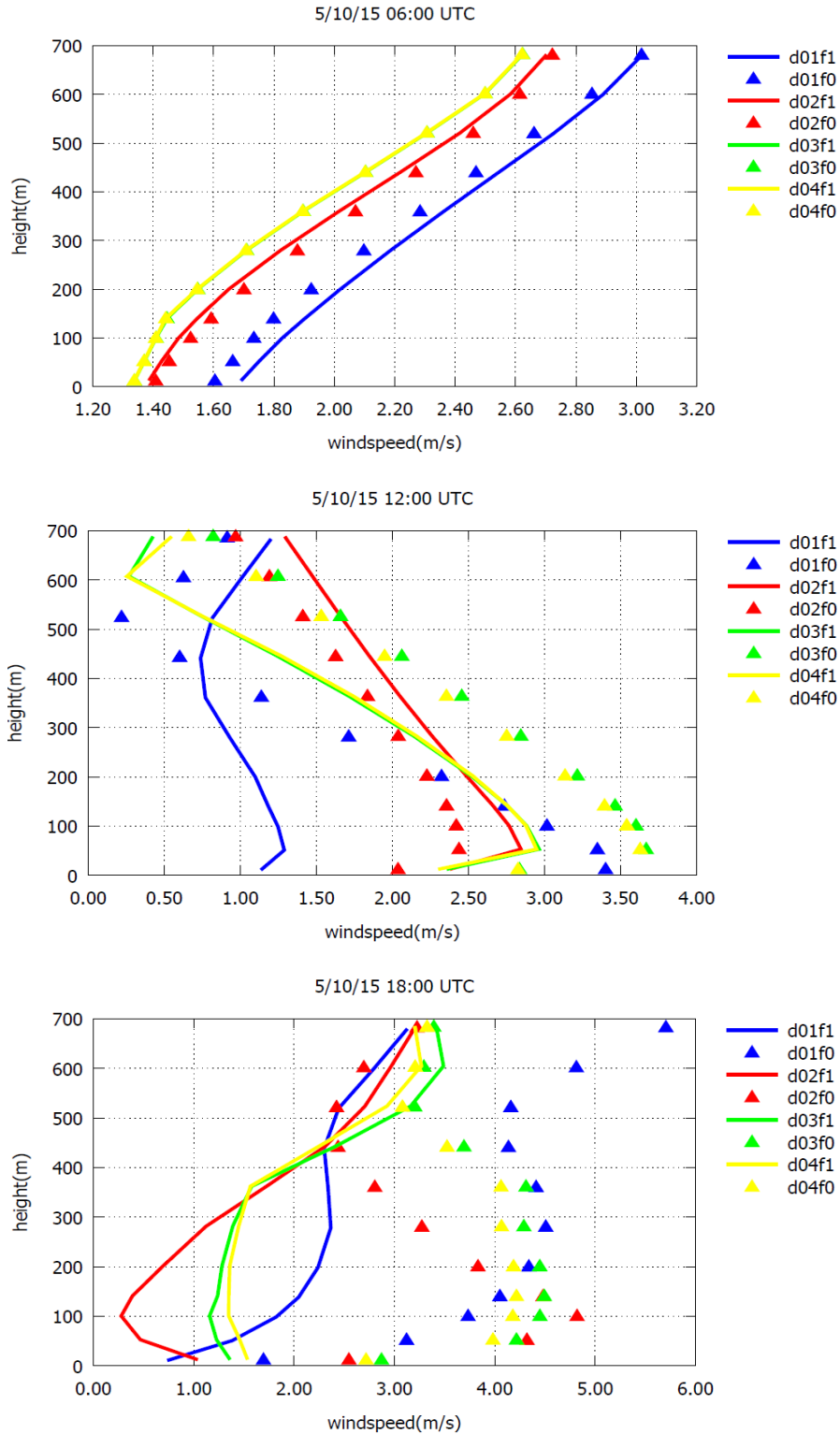
Setup_1 – Feedback Option

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο 3.2.6 υποκεφάλαιο του 3^{ου} κεφαλαίου, προκειμένου να επικρατεί συνέπεια στα σημεία που συμπίπτουν ο μητρικός τομέας με το υποπλέγμα, οι τιμές του υποπλέγματος οι οποίες προκύπτουν σε επόμενο χρονικό βήμα, πρέπει να ανατροφοδοτούνται πίσω στον μητρικό τομέα. Οι τιμές επιστρέφουν σαν μέσοι όροι του συνόλου των κελιών του υποπλέγματος. Πρόκειται για τιμές πίεσης, ταχύτητας, θερμοκρασίας και άλλων μετεωρολογικών παραμέτρων. Θα πρέπει να ενεργοποιηθεί από το namelist.input του WRF section η επιλογή `feedback=1`, η οποία ισοδυναμεί με το “two way nesting” που έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 3.2.6 «Χρήση υποπλεγμάτων».

Για πλέγμα πάνω από την Ελλάδα και έπειτα την Αττική, την Αθήνα, την Πολυτεχνειούπολη στις 5-10-2015 και για τις εξής δυο περιπτώσεις με i) `feedback=0` και ii) `feedback=1` προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα 5.1.1-5.1.2, θερμοκρασίας και ταχύτητας ανέμου συναρτήσει του ύψους $height=f(T)$, $height=f(W)$ αντίστοιχα.



Σχήμα 5.1.1: Καθ' ύψος κατατομή θερμοκρασίας πάνω από την Πολυτεχνειούπολη ΕΜΠ (γ.π. 37.97453, γ.μ. 23.76828) σε τρεις διαφορετικές ώρες της ημέρας και για τα τέσσερα πλέγματα (d01,d02,d03,d04) με feedback=1 (f1) και feedback=0 (f0)



Σχήμα 5.1.2: Καθ' ύψος κατατομή ταχύτητας πάνω από την Πολυτεχνειούπολη ΕΜΠ (γ.π. 37.97453 , γ.μ. 23.76828) σε τρεις διαφορετικές ώρες της ημέρας και για τα τέσσερα πλέγματα (d01,d02,d03,d04) με feedback=1 (f1) και feedback=0 (f0)

Κατά την εφαρμογή $feedback=0$ ("one way nesting") η επίλυση του πλέγματος $d01$ δίνει τις οριακές συνθήκες για το πλέγμα $d02$, η λύση του οποίου δεν επηρεάζει την επίλυση του $d01$. Επιλύονται parent και nested πλέγμα, χωρίς τα δυο αυτά να επικοινωνούν. Έτσι το $d01f0$ πλέγμα είναι η λύση για το αραιό πλέγμα όπως προκύπτει από τις οριακές του συνθήκες. Το $d02f0$ αφορά την επίλυση του εσωτερικού του τομέα του πλέγματος $d02$. Προκύπτει από τις οριακές συνθήκες του $d01$ στα συνοριακά σημεία του τομέα $d02$ και επίλυση του $d02$ στην συνέχεια.

Κατά την εφαρμογή $feedback=1$ ("two way nesting"), η προσομοίωση στο εσωτερικό του δεύτερου τομέα $d02$ κάνει απευθείας αντικατάσταση στις τιμές του μητρικού τομέα $d01$. Έτσι για το $d01f1$ αραιό πλέγμα, αρχικά γίνεται ένας πρώτος υπολογισμός του, βάσει οριακών συνθηκών. Όμως στα σημεία που υπάρχει το υποπλέγμα $d02$, επιλύονται βάσει οριακών συνθηκών του μητρικού και η λύση αυτή επιστρέφει λόγω του $feedback$ στο $d01$ πλέγμα. Έτσι προκύπτει η πρώτη λύση για το $d01f1$. Με την λύση αυτή, και τις οριακές συνθήκες από παρεμβολή (πλευρικές και στα όρια), επιλύεται το εσωτερικό του πλέγματος $d02$ και αντικαθίστώνται πάλι οι τιμές στο εσωτερικό του $d01f1$ και άρα επαναυπολογίζει. Προκύπτει το νέο $d01f1'$ από το οποίο κατά τον ίδιο τρόπο με παρεμβολή προκύπτουν οι απαιτούμενες οριακές συνθήκες για την επίλυση του καινούριου πιο κοντά στη λύση $d02f1$ πλέγματος. Η παραπάνω διαδικασία και για τα δυο πλέγματα θα γίνεται μέχρι συγκλίσεως. Τελευταίο θα υπολογίζεται το μητρικό $d01f1$ πλέγμα.

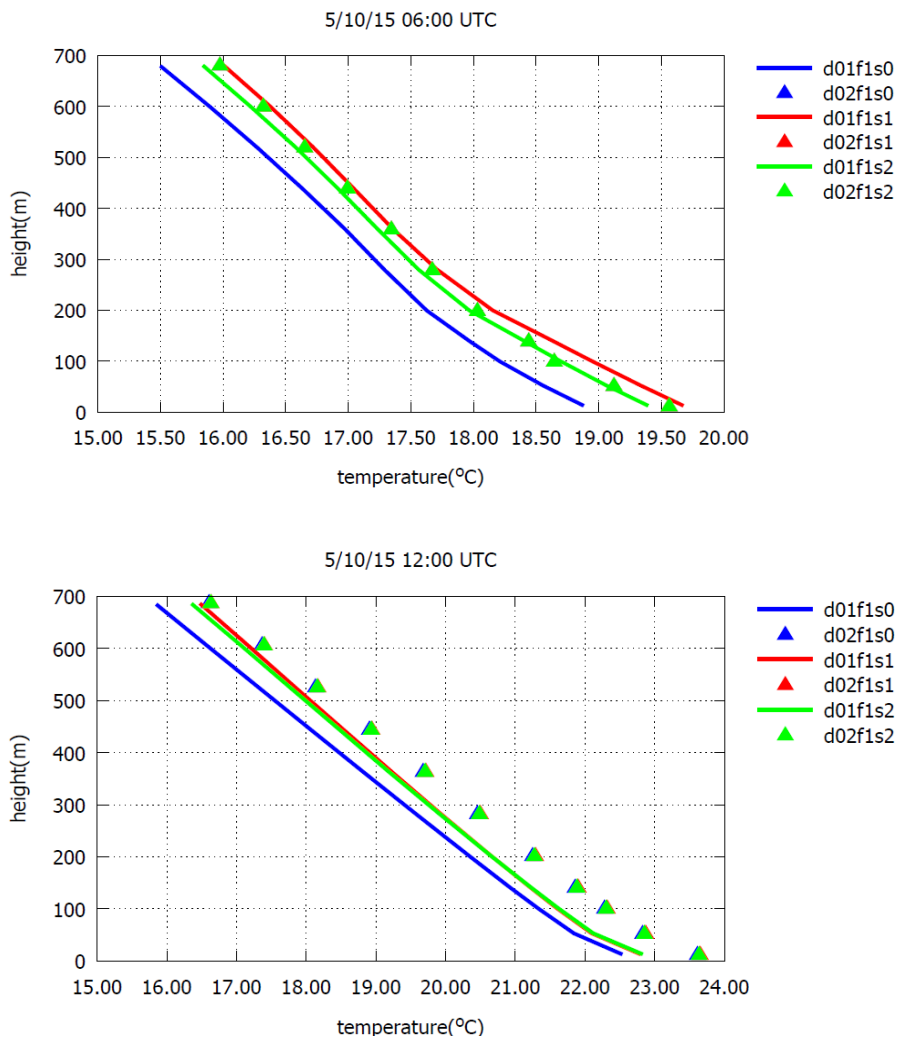
Από το Σχήμα 5.1.1 φαίνεται πως είτε με είτε χωρίς $feedback$ οι γραφικές παραστάσεις για τις θερμοκρασίες του εκάστοτε τομέα σχεδόν συμπίπτουν στις περισσότερες ώρες, τυπικά οι (06:00,12:00 και 18:00). Σημαντικές αποκλίσεις παρατηρούνται στις ταχύτητες του Σχήματος 5.1.2, ειδικά μετά την ανατολή του ήλιου όπου επικρατεί ατμοσφαιρική αστάθεια.

Από τα διαγράμματα σε τρεις τυπικές ώρες (06:00,12:00 και 18:00 UTC) εύκολα διακρίνεται πως ο 3^{ος} και ο 4^{ος} τομέας έχουν σχεδόν ίδιες τιμές στο γεωγραφικό μήκος και γεωγραφικό πλάτος ενδιαφέροντος και οι γραφικές τους παραστάσεις σχεδόν συμπίπτουν. Επομένως το πλέγμα από τον 3^ο τομέα και έπειτα θα παρουσιάζει ίδια συμπεριφορά στον υπολογισμό του, κάτι που οδηγεί σε ανεξαρτησία του πλέγματος στην X κατεύθυνση.

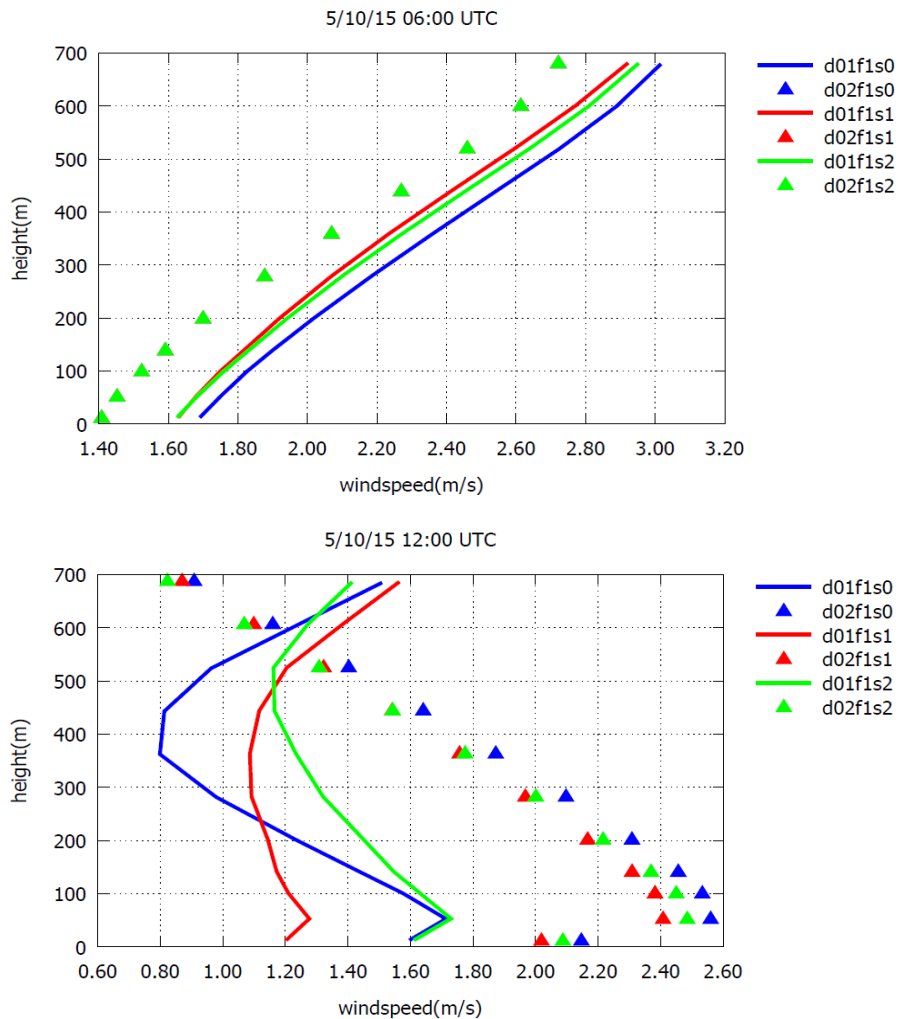
Setup_1 – Smooth Option

Η επιλογή αυτή έχει νόημα όταν το feedback option (“two way nesting”) είναι ενεργό. Επομένως είτε δεν ενεργοποιείται η εξομάλυνση του μητρικού τομέα, i) smooth=0, είτε με την ενεργοποίησή της ο κώδικας αφού επιστρέφει τις τιμές στον μητρικό τομέα, τις εξομαλύνει με την μέθοδο ii) 5 point 1-2-1 smoothing ή με iii) smoothing-desmoothing.

Για τις 3 παραπάνω περιπτώσεις προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα



Σχήμα 5.1.3: Καθ' ύψος κατατομή θερμοκρασίας πάνω από την Πολυτεχνειούπολη ΕΜΠ (γ.π. 37.97453 , γ.μ. 23.76828) σε δυο διαφορετικές ώρες της ημέρας, για τα δυο πλέγματα (d01,d02) με smooth=0 (s0) smooth=1 (s1) και smooth=2 (s2)



Σχήμα 5.1.4: Καθ' ύψος κατατομή ταχύτητας πάνω από την Πολυτεχνειούπολη ΕΜΠ (γ.π. 37.97453 , γ.μ. 23.76828) σε δυο διαφορετικές ώρες της ημέρας, για τα δυο πλέγματα (d01,d02) με smooth=0 (s0) smooth=1 (s1) και smooth=2 (s2)

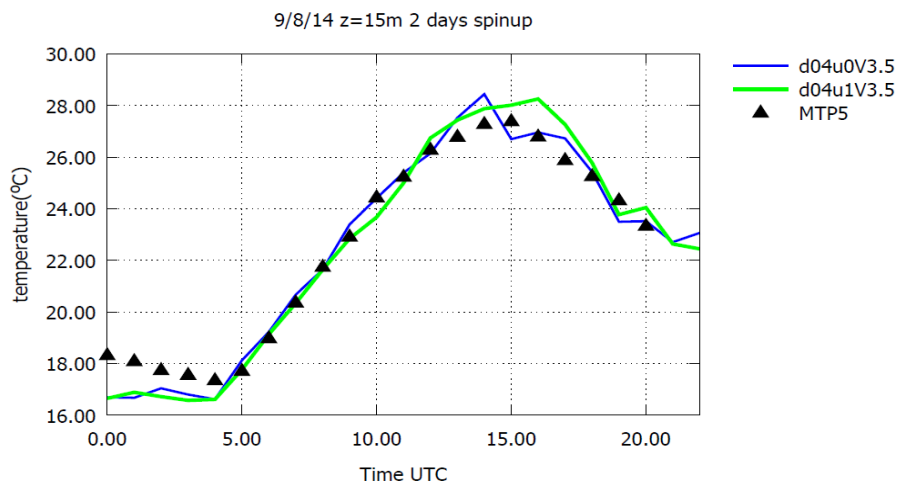
Η μελέτη έγινε για τους πρώτους 2 τομείς d01 και d02 στο γεωγραφικό μήκος και πλάτος Αθήνας. Οι συγκρίσεις έχουν νόημα για τον πρώτο τομέα (d01), όπου και γίνεται η εξομάλυνση μετά την ανατροφοδότηση (smooth option)²¹. Σύμφωνα με τα Σχήμα 5.1.3 και 5.1.4 θερμοκρασιών και ταχυτήτων (τυπικά στις 06:00 και στις 12:00) φαίνεται πως οι καμπύλες με 1-2-1 smoothing και smoothing/desmothing, είναι πολύ κοντά για τις περισσότερες ώρες. Το d01 πλέγμα χωρίς smooth option φαίνεται να αποκλίνει ελάχιστα. Η μελέτη αυτή της εξομάλυνσης για το μητρικό

²¹ Περισσότερες πληροφορίες για τα smooth options είναι διαθέσιμες στο site http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/users_guide_chap5.htm

πλέγμα έγινε καθαρά για λόγους εκμάθησης και αποτύπωσης της συμπεριφοράς μεταξύ διαφορετικών επιλογών στο ίδιο πλέγμα. Δεν χρησιμοποιείται στις επόμενες προσομοιώσεις.

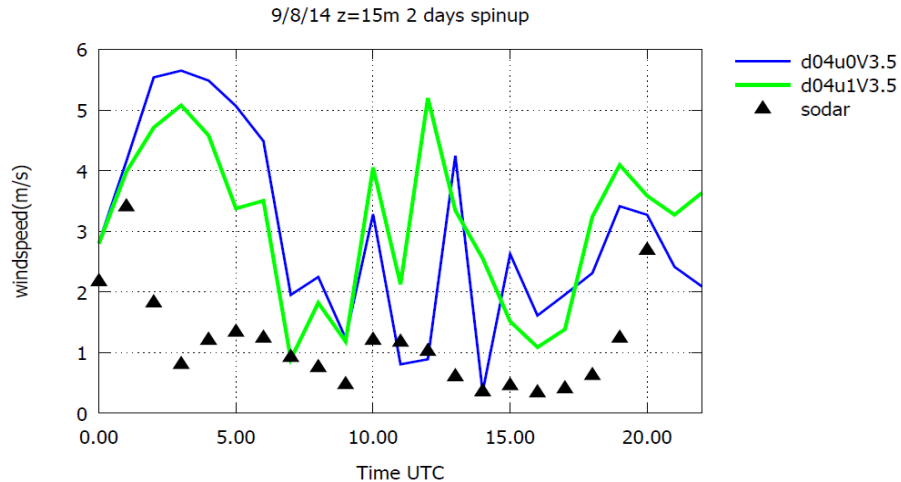
5.2 Περίπτωση Κοζάνης (Setup_2) 9-8-2014

Στα παρακάτω διαγράμματα δίνεται έμφαση στην σύγκριση των πειραματικών δεδομένων από τους μετεωρολογικούς σταθμούς (MTP5 και SODAR) εγκαταστημένους στην περιοχή του πανεπιστημίου, εντός της πόλης της Κοζάνης, με τα αντίστοιχα διαγράμματα που δημιουργούνται από την WRF προσομοίωση. Οι πρώτες συγκρίσεις στον επεξεργαστή WRFV3.5, αφορούν την ενεργοποίηση ή όχι της επιλογής `sf_urban_physics`. Για `sf_urban_physics=0`, δεν γίνεται χρήση της αστικής γεωμετρίας, ενώ με `sf_urban_physics=1`, ενεργοποιείται η επιλογή του UCM²² ή `single layer` με επιδράσεις των επιφανειών από οροφές, τοίχους και δρόμους. Με χρήση του WRFV3.5 και για προσομοίωση με spin up 2 μερών, προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα στα πρώτα σημεία αλλά και σε όλο το ύψος των μετρήσεων.



Σχήμα 5.2.1: Κατανομή θερμοκρασιών για το πρώτο σημείο κατά την διάρκεια του 24ώρου πάνω από την πόλη της Κοζάνης (γ.π. 40.3002635 , γ.μ. 21.800083) στις 9/8 για το d04 πλέγμα με `sf_urban_physics=0` (u0) και `sf_urban_physics=1` (u1).

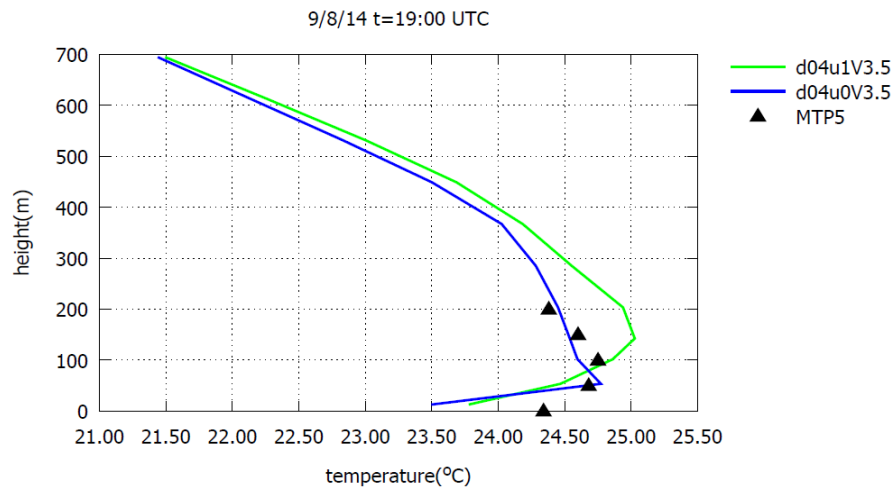
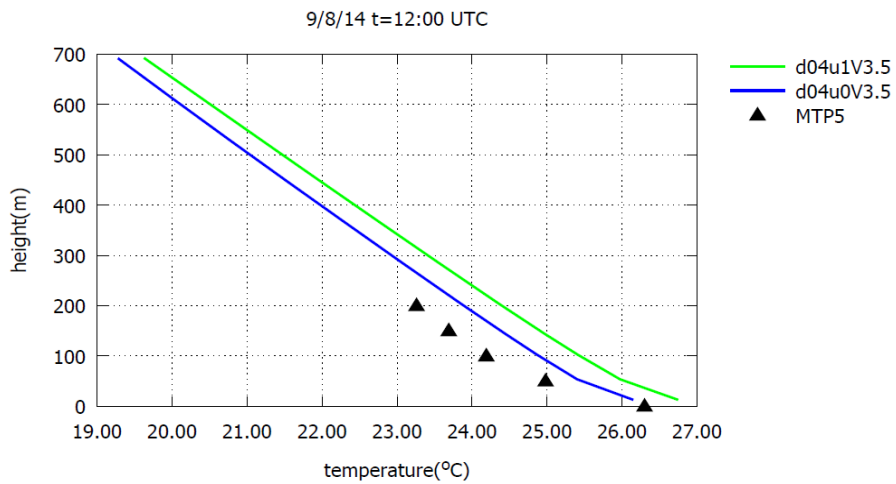
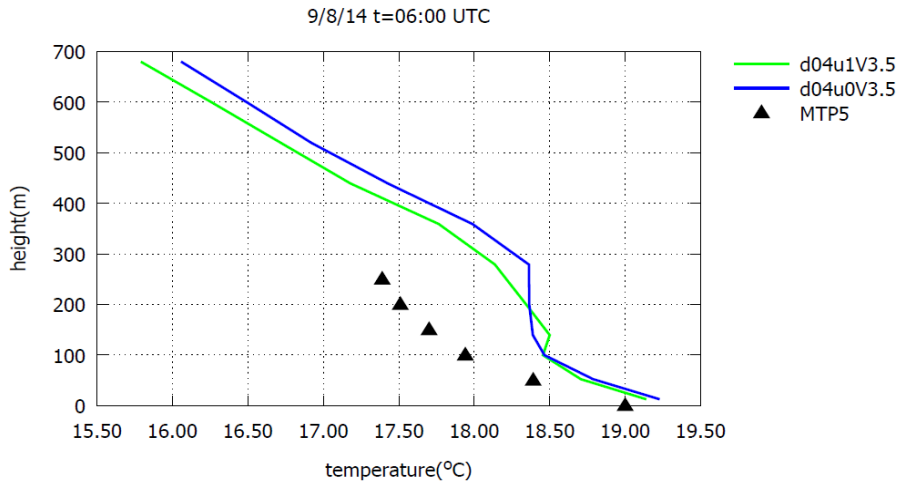
²² UCM: Urban Canopy Model ή πρότυπο αστικού θόλου. Περισσότερα στο υποκεφάλαιο 3.2.7.4 του 3^{ου} κεφαλαίου.



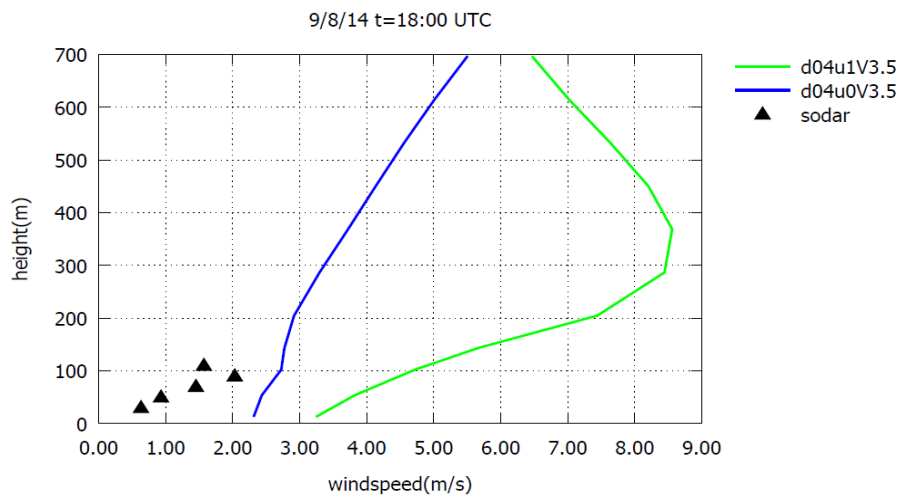
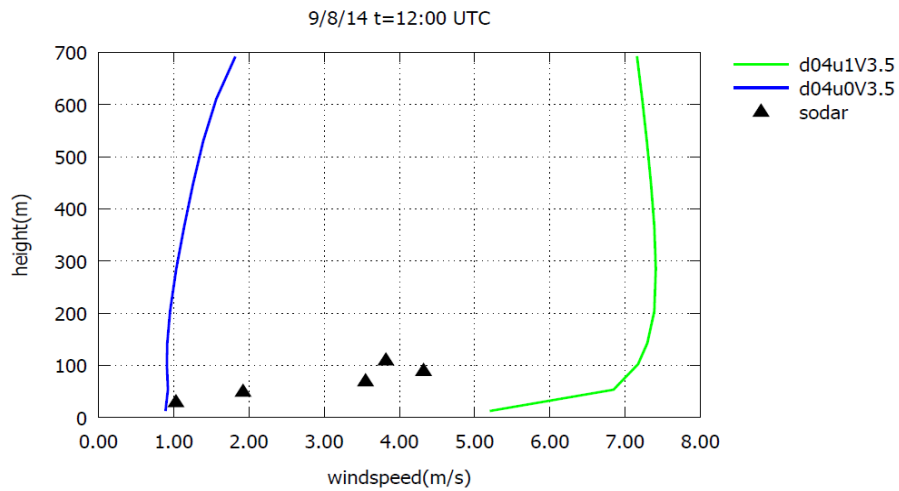
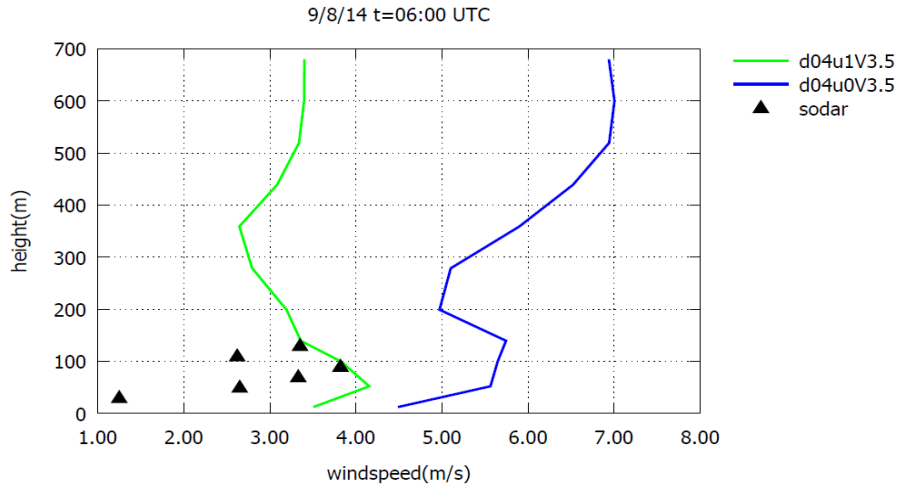
Σχήμα 5.2.2: Κατανομή ταχυτήτων για το πρώτο σημείο κατά την διάρκεια του 24ώρου πάνω από την πόλη της Κοζάνης (γ.π. 40.3002635 , γ.μ. 21.800083) στις 9/8 για το d04 πλέγμα με sf_urban_physics=0 (u0) και sf_urban_physics=1 (u1).

Στο Σχήμα 5.2.1 παρατηρούνται οι κατανομές της θερμοκρασίας για την πόλη της Κοζάνης στο γεωγραφικό πλάτος και μήκος ενδιαφέροντος. Τα διαγράμματα αυτά έγιναν στο πρώτο σημείο ύψους περίπου 15m. Συνολικά διαπιστώνεται πως οι δυο προσομοιώσεις σχεδόν ταυτίζονται με το MTP5. Από τις 00:00-04:00 UTC φαίνεται πως είτε με είτε χωρίς Urban Canopy, το WRF υποεκτιμά τις θερμοκρασίες. Στις επόμενες ώρες φαίνεται πως και οι 3 καμπύλες ταυτίζονται. Τις μεσημεριανές ώρες παρατηρείται ελάχιστη μεταβολή με ελαφρά υπερεκτίμηση των θερμοκρασιών, κάτι που τις απογευματινές ώρες εξαλείφεται και οι προσεγγίσεις με τις δυο μεθόδους είναι και πάλι ικανοποιητικές.

Στο Σχήμα 5.2.2 παρατηρούνται οι κατανομές των ταχυτήτων για την πόλη της Κοζάνης στο γεωγραφικό πλάτος και μήκος ενδιαφέροντος. Διαπιστώνονται σημαντικές αποκλίσεις είτε με είτε χωρίς το Urban Canopy, καθώς σχεδόν σε όλες τις ώρες της μέρας καθώς υπάρχει υπερεκτίμηση των ταχυτήτων από αυτές που μετρά το SODAR, οι οποίες είναι ούτως ή άλλως χαμηλές. Οι δυο καμπύλες έχουν σχεδόν ίδιο εύρος ταχυτήτων. Το ενεργοποιημένο Urban Canopy όμως φαίνεται να αντιλαμβάνεται καλύτερα τις μεταβολές των ταχυτήτων που υπολογίζει το SODAR.



Σχήμα 5.2.3: Καθ' ύψος κατανομή θερμοκρασίας πάνω από την πόλη της Κοζάνης (γ.π. 40.3002635 , γ.μ. 21.800083) στις 9/8, σε τρεις διαφορετικές ώρες της ημέρας, για το d04 πλέγμα, με $sf_urban_physics=0$ (u0) και $sf_urban_physics=1$ (u1)



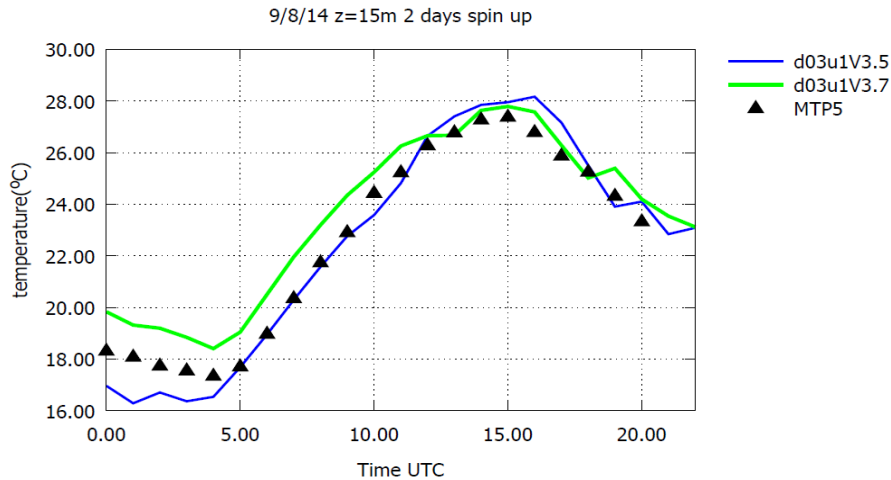
Σχήμα 5.2.4: Καθ' ύψος κατανομή ταχυτήτων πάνω από την πόλη της Κοζάνης (γ.π. 40.3002635 , γ.μ. 21.800083) στις 9/8, σε τρεις διαφορετικές ώρες της ημέρας, για το d04 πλέγμα, με sf_urban_physics=0 (u0) και sf_urban_physics=1 (u1)

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 5.2.3, η γενικότερη εικόνα για τα προφίλ των θερμοκρασιών συναρτήσει του ύψους είναι πολύ ικανοποιητική. Για τις θερμοκρασίες στις 06:00 UTC, φαίνεται πως και οι δυο καμπύλες ακολουθούν το προφίλ του MTP5, με την επιλογή του Urban Canopy να διαφοροποιείται ελάχιστα. Στις 12:00 UTC η διαφοροποίηση αυτή φαίνεται να γίνεται ελαφρώς μεγαλύτερη για το Canopy Model, χωρίς όμως αυτό να θεωρείται υπερβολικό. Στις 19:00 UTC όμως οι διαφορές αυτές είναι και πάλι μηδενικής σημασίας και πολύ κοντά στο MTP5.

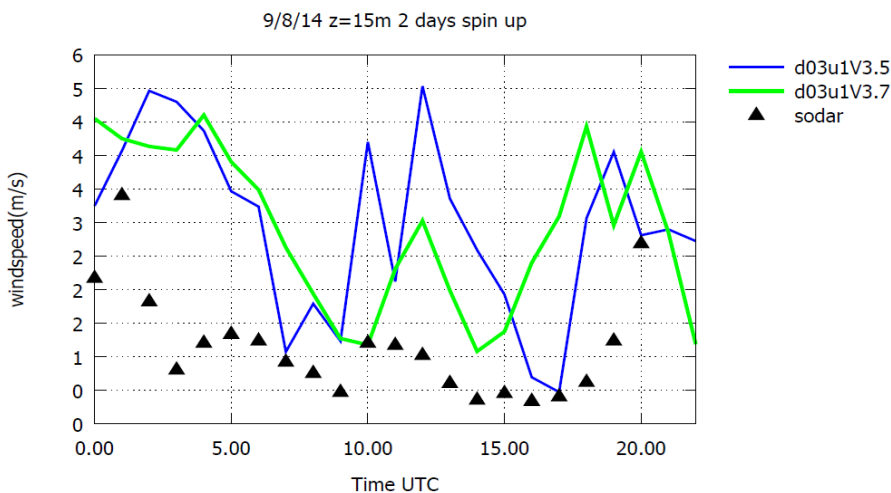
Τα διαγράμματα των ταχυτήτων σύμφωνα με το Σχήμα 5.2.4 σε σύγκριση με το SODAR δεν παρουσιάζουν την ίδια εικόνα. Στις 06:00 UTC, η καμπύλη χωρίς το Urban Canopy αποκλίνει από τις άλλες δυο υπερεκτιμώντας τις ταχύτητες. Στις 12:00 UTC η καμπύλη με το Urban Canopy υπερεκτιμά τις ταχύτητες ενώ η άλλη χωρίς αυτό τις υποεκτιμά, με την τελευταία να είναι πιο κοντά στις μετρήσεις του SODAR. Στις 18:00 UTC η καμπύλη του Urban Canopy συνεχίζει να αποκλίνει σημαντικά με υπερεκτίμηση των ταχυτήτων, ενώ φαίνεται πως το προφίλ της καμπύλης χωρίς το Canopy προσεγγίζει καλύτερα το SODAR.

Σε ότι αφορά την μεταβολή της κατάστασης της ατμόσφαιρας κατά την διάρκεια του 24ώρου, φαίνεται από τα Σχήματα 5.2.3 και 5.2.4 πως οι WRF προσομοιώσεις ακολουθούν τις τυπικές μεταβολές της θερμοβαθμίδας. Στις 06:00 UTC ή 08:00 ώρα Ελλάδας, υπολογίζεται μια ανυψωμένη αναστροφή με βάση στα 100m υψόμετρο. Η προσομοίωση με το Urban Canopy έχει ένα πολύ μικρό στρώμα αναστροφής και επιστρέφει γρήγορα σε αστάθεια, σε αντίθεση με την προσομοίωση χωρίς το Canopy, που υπολογίζει ένα στρώμα αναστροφής περίπου 200m και επιστρέφει ύστερα σε αστάθεια. Στις 12:00 UTC ή 14:00 ώρα Ελλάδας, ελάχιστη αστάθεια παρατηρείται και σε μικρά ύψη, ενώ πολύ γρήγορα έχουμε ουδέτερη κατάσταση. Στις 19:00 UTC ή 21:00 ώρα Ελλάδας, υπολογίζεται μια αναστροφή εδάφους είτε με είτε χωρίς το Canopy. Το στρώμα αναστροφής ανέρχεται μέχρι τα 150m για την περίπτωση του Canopy, μέχρι τα 50 – 60m, για την δεύτερη περίπτωση και τα 100m περίπου υπολογίζει το MTP5.

Παρακάτω εμφανίζονται τα ίδια διαγράμματα του 3^{ου} πλέγματος με χρήση του επεξεργαστή WRFV3.7 και για προσομοίωση με spin up 2 μερών, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα του WRFV3.5 στα πρώτα σημεία, με χρήση του Urban Canopy Model και στους δυο επεξεργαστές.



Σχήμα 5.2.5: Κατανομή θερμοκρασιών για το πρώτο σημείο κατά την διάρκεια του 24ώρου πάνω από την πόλη της Κοζάνης (γ.π. 40.3002635 , γ.μ. 21.800083) στις 9/8 για το d03 πλέγμα με sf_urban_physics=1 (u1) για τους επεξεργαστές WRFV3.5 (V3.5) και WRFV3.7 (V3.7).



Σχήμα 5.2.6: Κατανομή ταχυτήτων για το πρώτο σημείο κατά την διάρκεια του 24ώρου πάνω από την πόλη της Κοζάνης (γ.π. 40.3002635 , γ.μ. 21.800083) στις 9/8 για το d03 πλέγμα με sf_urban_physics=1 (u1) για τους επεξεργαστές WRFV3.5 (V3.5) και WRFV3.7 (V3.7).

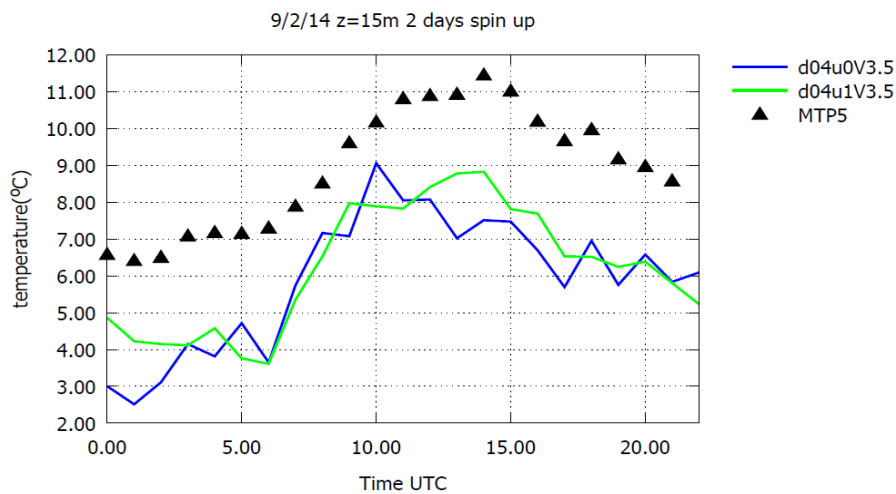
Σύμφωνα με το Σχήμα 5.2.5 φαίνεται πως συνολικά οι δυο προσομοιώσεις προσεγγίζουν ικανοποιητικά το MTP5. Για τον WRFV3.7 παρατηρείται μια ελαφριά υπερεκτίμηση των θερμοκρασιών από τις 00:00-11:00 UTC. Στον WRFV3.5 αντιθέτως υπάρχει μια υποεκτίμηση από τις 00:00-04:00 UTC, ενώ από τις 04:00-12:00 UTC τα υπολογιζόμενα σημεία ταυτίζονται. Τις μεσημεριανές ώρες από τις 12:00-18:00 UTC αντίθετα φαίνεται πως ο WRFV3.7 έχει προσεγγίσει πολύ καλύτερα το MTP5 σε σχέση με το WRFV3.5 που ελάχιστα υπερεκτιμά τις θερμοκρασίες.

Στις ταχύτητες του Σχήματος 5.2.6 παρατηρούνται πάλι αποκλίσεις από τις μετρήσεις του SODAR. Ναι μεν και οι δυο επεξεργαστές αντιλαμβάνονται τις ίδιες μεταβολές στις ταχύτητες, έχοντας το ίδιο προφίλ με το SODAR, αλλά με προφανή υπερεκτίμηση.

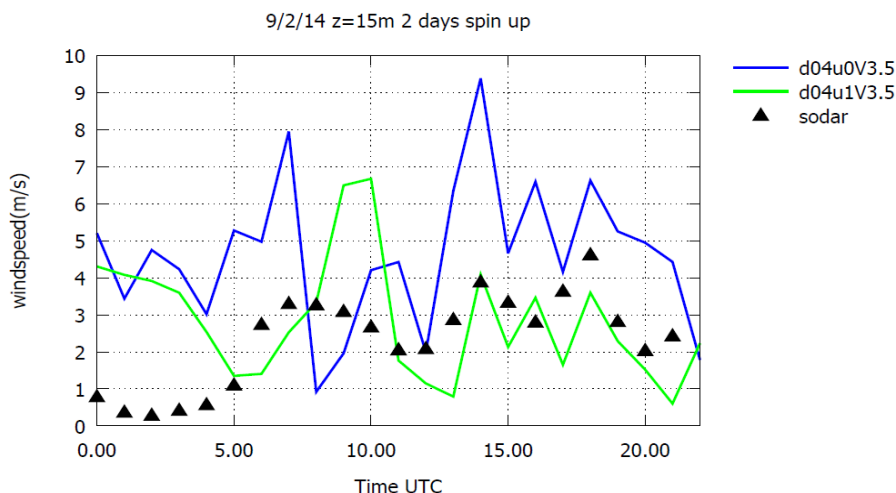
5.3 Περίπτωση Κοζάνης (Setup_2) 9-2-2014

Πρόκειται για αντίστοιχη περίπτωση με αυτήν του Αυγούστου στην ίδια τοποθεσία στην Κοζάνη. Πάλι έγινε χρήση των δυο επεξεργαστών WRFV3.5 και WRFV3.7, για την εξαγωγή των απαραίτητων συμπερασμάτων. Με τον WRFV3.5 εξετάζονται διαφορές με χρήση ή όχι ενός Urban Canopy Model, ενώ με τον WRFV3.7 εξετάζεται πόσο επηρεάζει η διαφορετική χρήση των οριακών συνθηκών (spin up comparisons) σε μια WRF προσομοίωση.

Με χρήση του WRFV3.5 τα διαγράμματα στα πρώτα σημεία και σε όλο το ύψος απεικονίζονται παρακάτω.



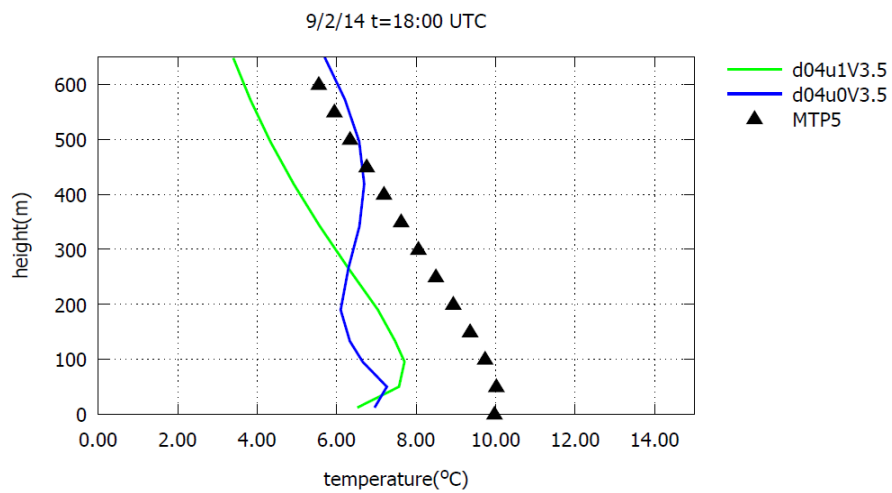
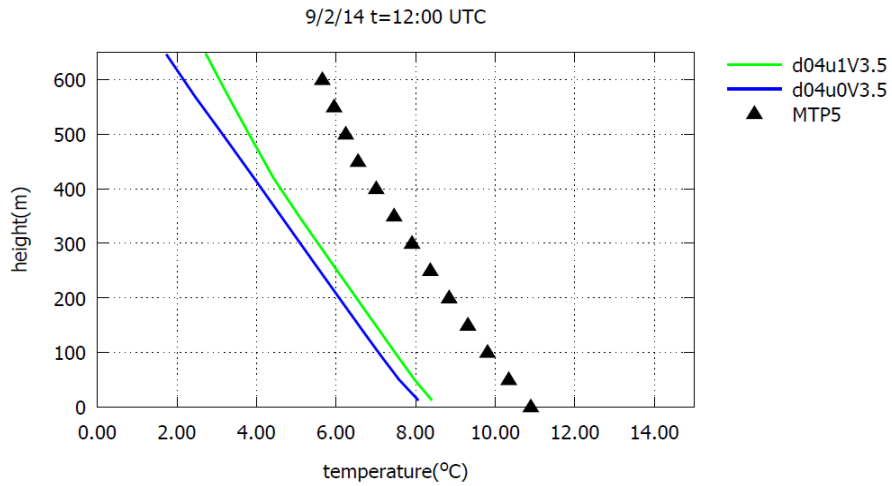
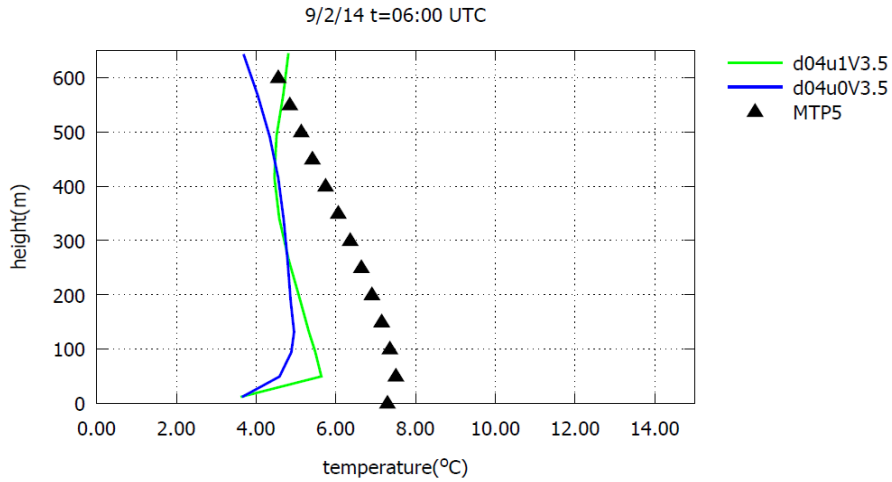
Σχήμα 5.3.1: Κατανομή θερμοκρασιών για το πρώτο σημείο κατά την διάρκεια του 24ώρου πάνω από την πόλη της Κοζάνης (γ.π. 40.3002635 , γ.μ. 21.800083) στις 9/2, για το d04 πλέγμα με sf_urban_physics=0 (u0) και sf_urban_physics=1 (u1).



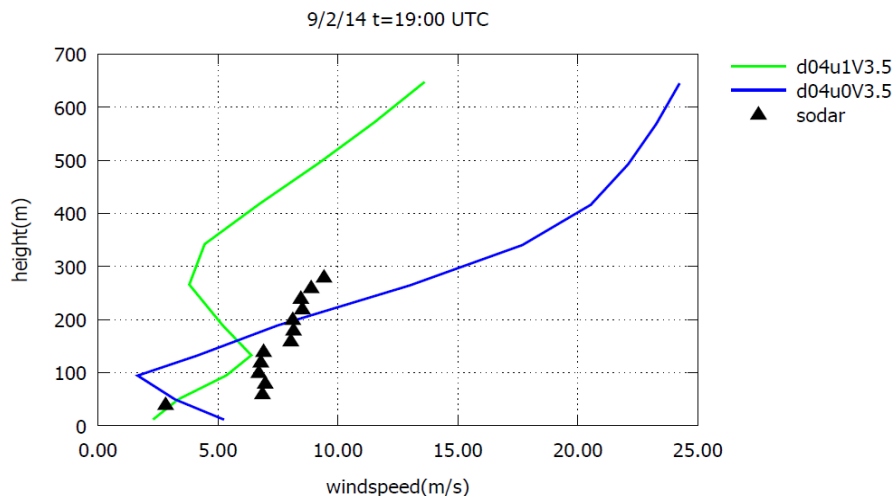
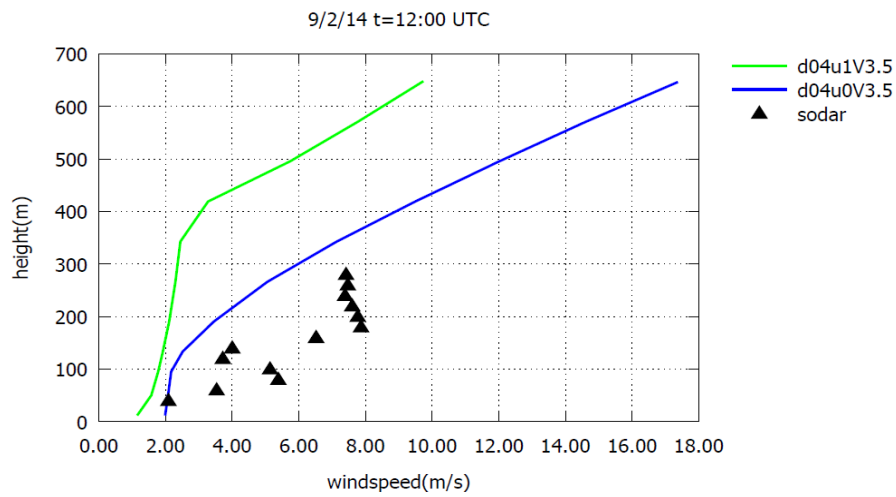
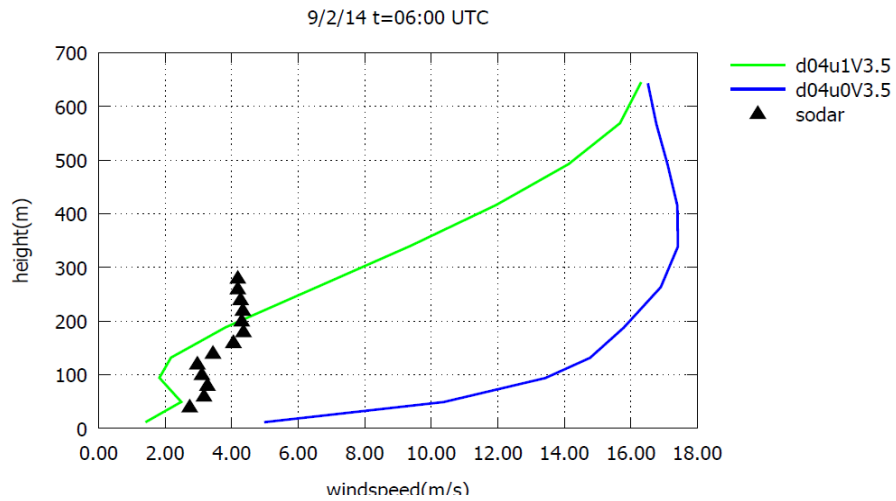
Σχήμα 5.3.2: Κατανομή ταχυτήτων για το πρώτο σημείο κατά την διάρκεια του 24ώρου πάνω από την πόλη της Κοζάνης (γ.π. 40.3002635 , γ.μ. 21.800083) στις 9/2, για το d04 πλέγμα με $sf_urban_physics=0$ (u0) και $sf_urban_physics=1$ (u1).

Τα διαγράμματα αυτά έγιναν για τις 9/2 στο πρώτο σημείο ύψους περίπου 15m. Η περίπτωση του Φεβρουαρίου είναι διαφορετική από αυτήν του Αυγούστου. Σύμφωνα με το Σχήμα 5.3.1, είτε με είτε χωρίς την χρήση Urban Canopy Model διαπιστώνεται μια προφανής υποεκτίμηση των θερμοκρασιών κατά την διάρκεια ολόκληρης της μέρας. Η καμπύλη χωρίς Canopy υποεκτιμά ελαφρώς περισσότερο σε συνολικό πλαίσιο. Επίσης φαίνεται πως τις μεσημεριανές ώρες κοντά στις 14:00 UTC η καμπύλη του Canopy Model αντιλαμβάνεται μια αύξηση θερμοκρασίας όπως το MTP5 σε αντίθεση με την άλλη καμπύλη. Το προφίλ και των δυο καμπυλών πέραν της υποεκτίμησης είναι κοντά σε αυτό του MTP5.

Για τις ταχύτητες του Σχήματος 5.3.2, παρατηρούνται αποκλίσεις, ωστόσο μικρότερου εύρους σε σχέση με τον Αύγουστο. Αρχικά παρατηρείται μια υπερεκτίμηση σε σχέση με το SODAR για τις πρώτες ώρες (00:00 – 05:00 UTC), είτε με είτε χωρίς το Urban Canopy. Για τις επόμενες ώρες κυρίως από τις 12:00-20:00 UTC φαίνεται πως η καμπύλη του Urban Canopy προσεγγίζει πολύ ικανοποιητικά το SODAR, κάτι που δεν φαίνεται να συμβαίνει και στην καμπύλη χωρίς Canopy, που συνεχίζει να υπερεκτιμά. Και εδώ φαίνεται πως το ενεργοποιημένο Urban Canopy, αντιλαμβάνεται καλύτερα τις μεταβολές των ταχυτήτων που υπολογίζει το SODAR.



Σχήμα 5.3.3: Καθ' ύψος κατανομή θερμοκρασίας πάνω από την πόλη της Κοζάνης (γ.π. 40.3002635 , γ.μ. 21.800083) στις 9/2, σε τρεις διαφορετικές ώρες της ημέρας, για το d04 πλέγμα, με $sf_urban_physics=0$ (u0) και $sf_urban_physics=1$ (u1)



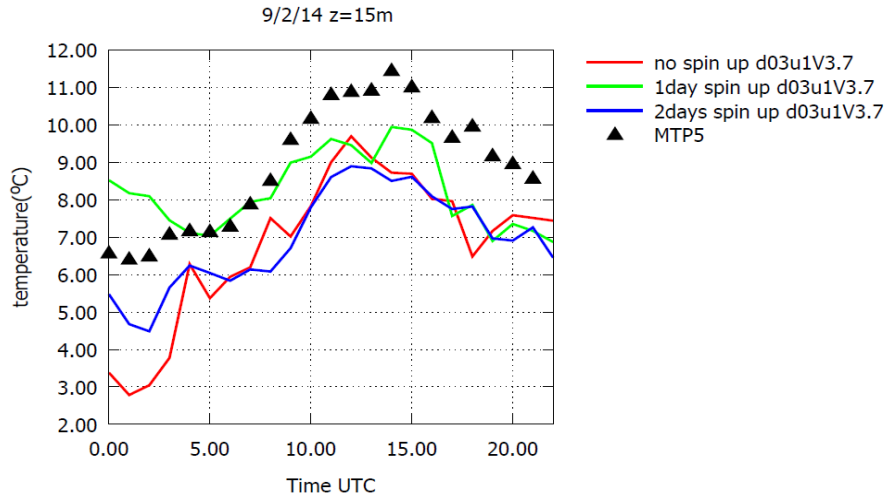
Σχήμα 5.3.4: Καθ' ύψος κατανομή ταχυτήτων πάνω από την πόλη της Κοζάνης (γ.π. 40.3002635 , γ.μ. 21.800083) στις 9/2, σε τρεις διαφορετικές ώρες της ημέρας, για το d04 πλέγμα, με sf_urban_physics=0 (u0) και sf_urban_physics=1 (u1)

Η γενικότερη εικόνα για τα προφίλ των θερμοκρασιών συναρτήσει του ύψους σύμφωνα με το Σχήμα 5.3.3, δεν είναι και πολύ ικανοποιητική. Ναι μεν η μορφή του προφίλ των δυο καμπυλών μοιάζει με αυτή του MTP5 αλλά παρατηρούνται αποκλίσεις στο εύρος των θερμοκρασιών σε όλο το ύψος των μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα για τις θερμοκρασίες στις 06:00 UTC, φαίνεται πως και οι δυο καμπύλες ακολουθούν το προφίλ του MTP5, αλλά με υποεκτίμηση τουλάχιστον 2°C μέχρι και τα 500m όπου η καμπύλη του Canopy αρχίζει να συγκλίνει. Στις 12:00 UTC η διαφοράς αυξάνονται και παρατηρείται υποεκτίμηση τουλάχιστον $2,5^{\circ}\text{C}$. Η καμπύλη του Canopy υποεκτιμά ελαφρώς λιγότερο. Στις 18:00 UTC μέχρι και τα 250m περίπου υπάρχει απόκλιση, ενώ πιο ψηλά η καμπύλη χωρίς το Canopy αρχίζει να συγκλίνει προς το MTP5.

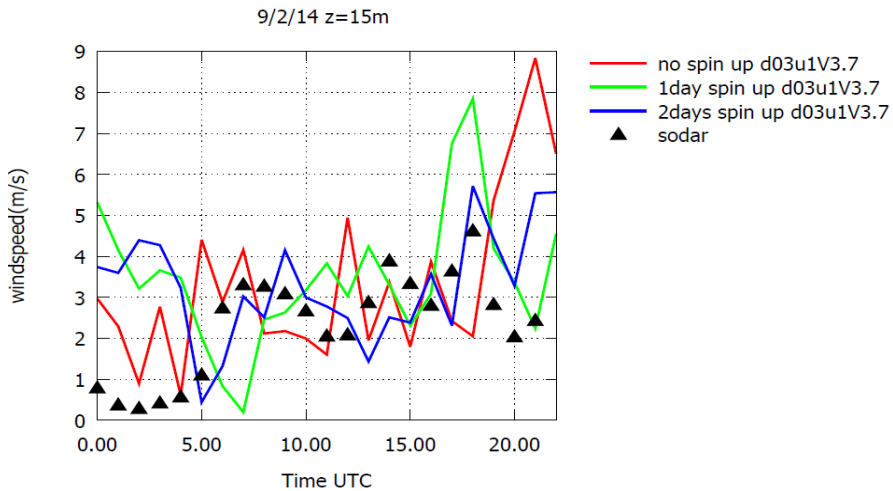
Για τις ταχύτητες του Σχήματος 5.3.4, στις 06:00 UTC, διαπιστώνεται πως η καμπύλη χωρίς το Urban Canopy αποκλίνει υπερεκτιμώντας τις ταχύτητες σε σχέση με την καμπύλη του Canopy που τις προσεγγίζει πολύ ικανοποιητικά και σχεδόν ταυτίζεται. Στις 12:00 UTC όμως η καμπύλη του Urban Canopy υποεκτιμά τις ταχύτητες για μεγαλύτερα ύψη, ενώ η καμπύλη χωρίς αυτό, συγκλίνει προς τις μετρήσεις του SODAR. Στις 19:00 UTC φαίνεται πάλι πως και οι δυο καμπύλες αποκλίνουν σημαντικά μετά τα πρώτα σημεία σε σχέση με το SODAR, ενώ υψηλότερα η καμπύλη χωρίς το Canopy αρχίζει πάλι να συγκλίνει.

Σε ότι αφορά την μεταβολή της κατάστασης της ατμόσφαιρας κατά την διάρκεια του 24ώρου, από τα Σχήματα 5.3.3 και 5.3.4, διαπιστώνεται πως οι WRF προσομοιώσεις, δεν ακολουθούν επακριβώς τις μεταβολές της. Στις 06:00 UTC ή 08:00 ώρα Ελλάδας, υπολογίζεται μια αναστροφή εδάφους αντί υπερυψωμένης, με ένα στρώμα αναστροφής περίπου τα 50m για τις προσομοιώσεις με ή χωρίς το Urban Canopy, αλλά και για τα πειραματικά σημεία αντίστοιχα. Έπειτα επικρατεί αστάθεια όπως προβλέπεται. Στις 12:00 UTC ή 14:00 ώρα Ελλάδας, παρατηρούνται τυπικές μεταβολές θερμοβαθμίδας, με ουδέτερη κατάσταση ατμόσφαιρας. Στις 18:00 UTC ή 20:00 ώρα Ελλάδας, παρατηρείται μια αναστροφή εδάφους όπως προβλέπεται για τις βραδινές ώρες. Το στρώμα αυτής φτάνει τα 50m για το MTP5 και την καμπύλη χωρίς το Canopy Model, ενώ τα 100m για την περίπτωση με το Urban Canopy.

Με την χρήση του WRFV3.7 προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα που αφορούν προσομοιώσεις, λόγω διαφορετικής χρονικής αφετηρίας των υπολογισμών, χρησιμοποιώντας οριακές συνθήκες της ίδιας μέρας no_spin up, 1ας μέρας 1 day spin up και 2 μερών 2 days spin up.



Σχήμα 5.3.5: Κατανομή θερμοκρασιών για το πρώτο σημείο κατά την διάρκεια του 24ώρου πάνω από την πόλη της Κοζάνης (γ.π. 40.3002635 , γ.μ. 21.800083) στις 9/2, για το d03 πλέγμα στον επεξεργαστή WRFV3.7 (V3.7) με sf_urban_physics=1 (u1), για 1) no spin up 2) 1day spin up, 3) 2days spin up.



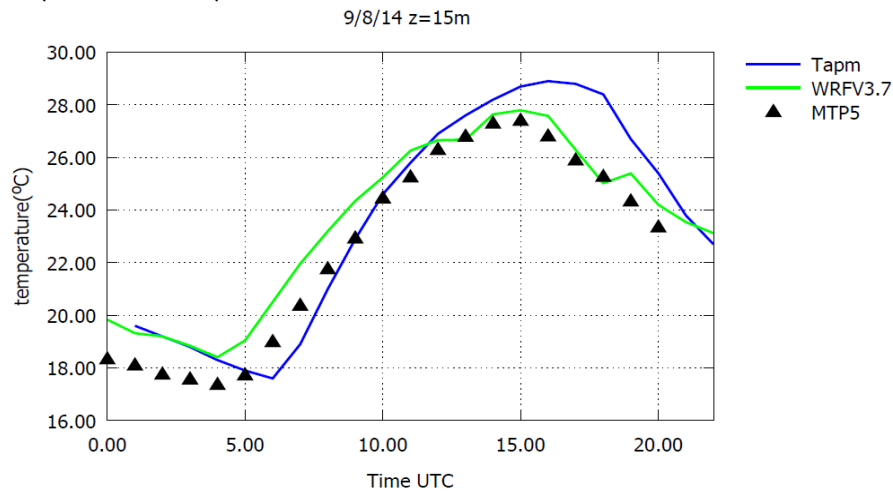
Σχήμα 5.3.6: Κατανομή ταχυτήτων για το πρώτο σημείο κατά την διάρκεια του 24ώρου πάνω από την πόλη της Κοζάνης (γ.π. 40.3002635 , γ.μ. 21.800083) στις 9/2, για το d03 πλέγμα στον επεξεργαστή WRFV3.7 (V3.7) με sf_urban_physics=1 (u1), για 1) no spin up 2) 1day spin up, 3) 2days spin up.

Οι μεταβολές του Σχήματος 5.3.5 έγιναν για τις 9/2 στο πρώτο σημείο ύψους περίπου 15m. Η καμπύλη με χρήση οριακών συνθηκών μιας μέρας (1 day spin up) φαίνεται να προσεγγίζει καλύτερα τις θερμοκρασίες του MTP5 συνολικά (εύρος θερμοκρασιών και προφίλ καμπύλης), καθώς από το διάγραμμα φαίνεται να μην υποεκτιμά το ίδιο τις θερμοκρασίες σε σχέση με τις άλλες δυο (no_spin up και 2 days spin up), οι οποίες, υποεκτιμούν τις μετρήσεις του MTP5 για όλη την διάρκεια της μέρας. Μάλιστα φαίνεται πως τις μεσημεριανές ώρες η καμπύλη του 1 day spin up, ελαττώνει αυτήν την διαφορά στην υποεκτίμηση για τουλάχιστον 1 – 1,5°C, ενώ από τις 03:00-08:00 τα σημεία της ταυτίζονται με αυτά του MTP5. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι οι οριακές συνθήκες GFS ανανεώνονται για την εκάστοτε ημέρα και η τελική πρόγνωση βασίζεται σε αυτές.

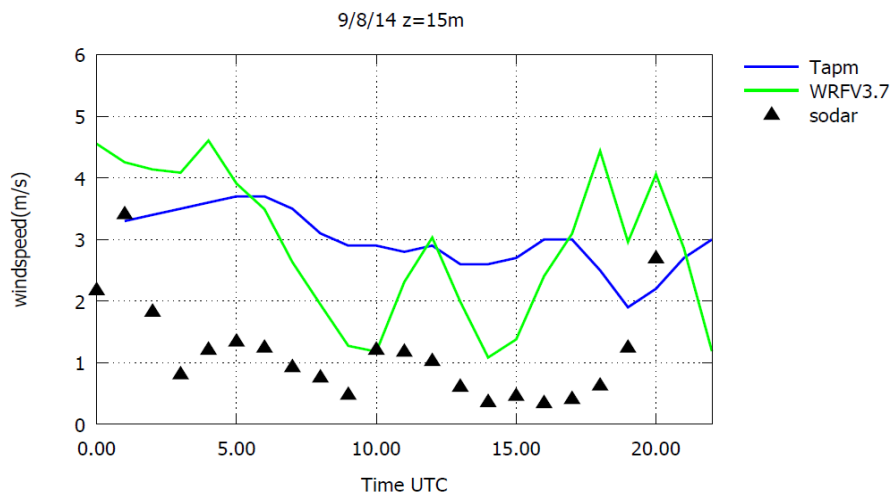
Με χρήση του WRFV3.7 όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.3.6 παρατηρούνται για τις ταχύτητες μικρότερες αποκλίσεις από αυτές που υπήρχαν τον Αύγουστο. Από το διάγραμμα φαίνεται πως οι προσομοιώσεις με 2 days spin up, προσεγγίζουν καλύτερα τις μετρήσεις του SODAR συνολικά (εύρος ταχυτήτων και προφίλ καμπύλης). Παρ' όλα αυτά και οι καμπύλες του no spin up και 1 day spin up είναι ικανοποιητικές παρά το γεγονός ότι αποκλίνουν μετά τις μεσημεριανές ώρες (15:00-20:00 UTC) που είναι απόλυτα φυσιολογικό. Από τις 00:00-05:00 UTC παρατηρείται μια υπερεκτίμηση των ταχυτήτων και για τις τρεις καμπύλες.

5.4 WRF και TAPM

Για να υπάρχει μια καλύτερη εικόνα των αποτελεσμάτων των παραπάνω προσομοιώσεων, παρουσιάζονται τα ίδια διαγράμματα με χρήση του επεξεργαστή WRFV3.7, σε σύγκριση με το λογισμικό TAPM που χρησιμοποιήθηκε στην Κοζάνη και τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα. Το πλέγμα του TAPM έχει την σύνθεση που αναφέρεται στο Setup_2 του κεφαλαίου 4.1. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τις 9 Αυγούστου.



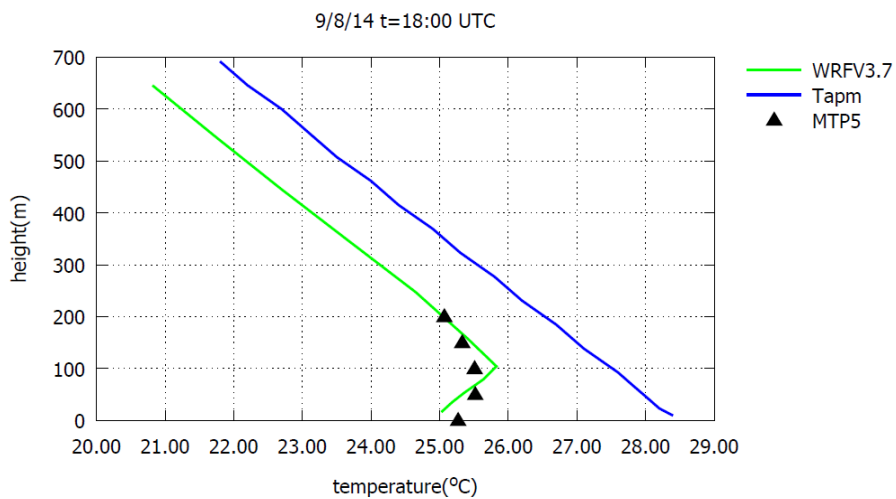
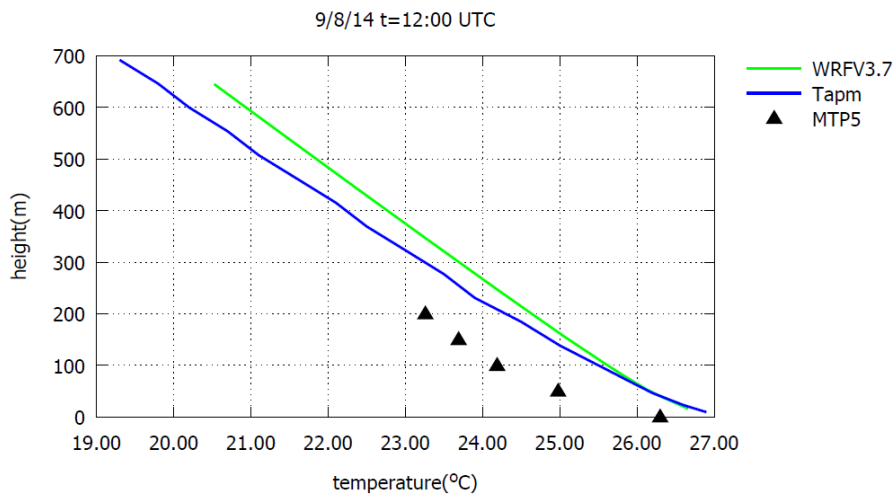
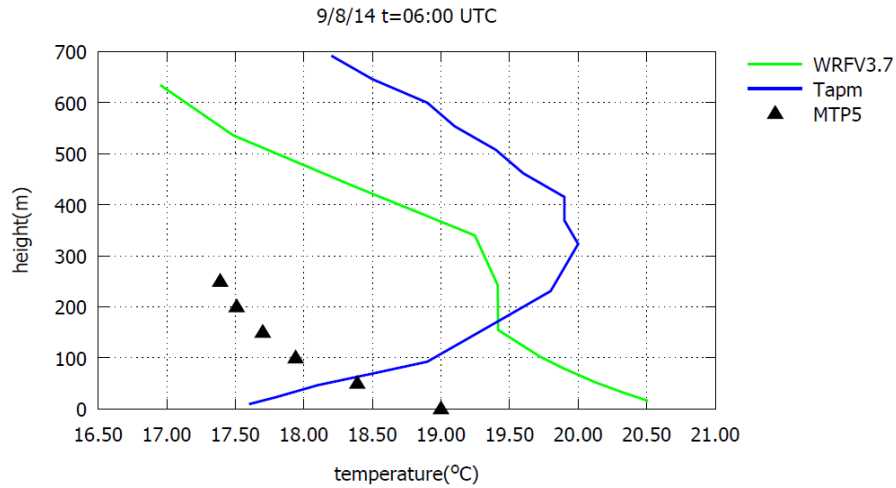
Σχήμα 5.4.1: Κατανομή θερμοκρασιών για το πρώτο σημείο κατά την διάρκεια του 24ώρου πάνω από την πόλη της Κοζάνης (γ.π. 40.3002635 , γ.μ. 21.800083) στις 9/8, με χρήση του επεξεργαστή WRFV3.7 και η σύγκριση με το TAPM



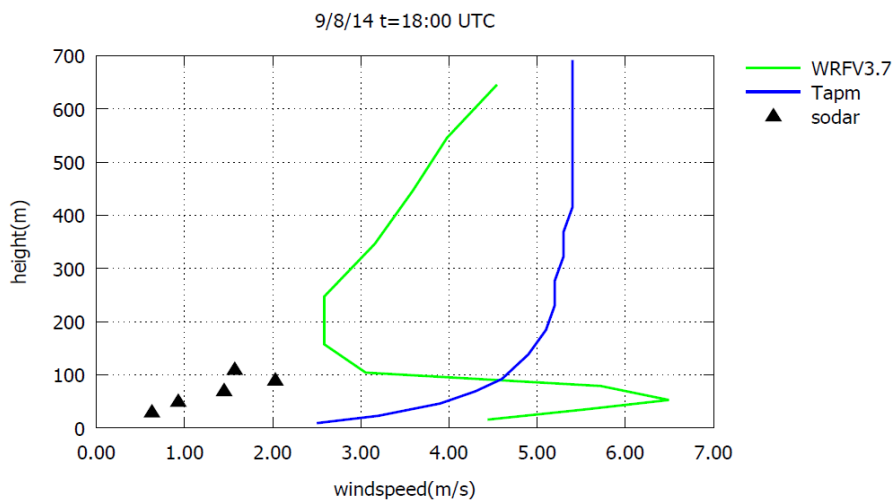
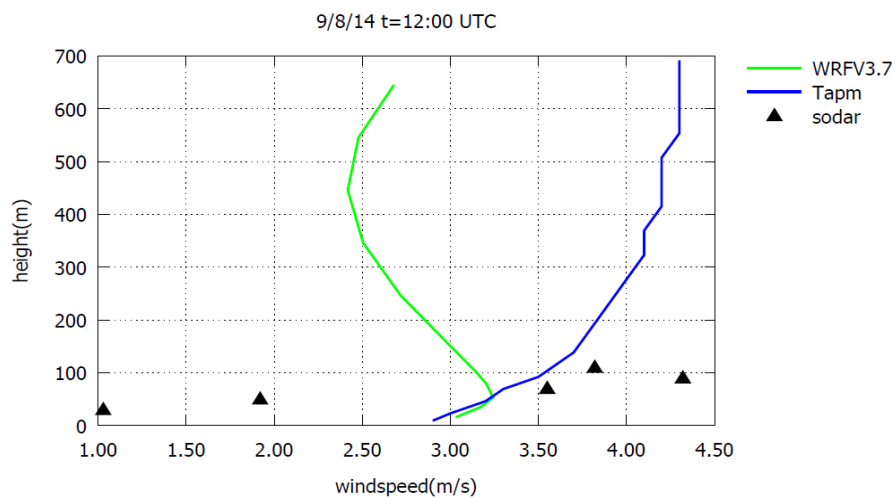
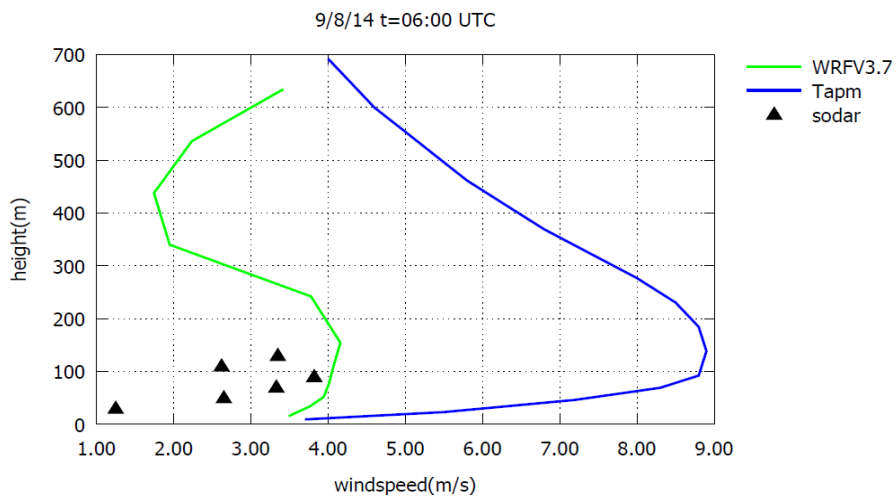
Σχήμα 5.4.2: Κατανομή ταχυτήτων για το πρώτο σημείο κατά την διάρκεια του 24ώρου πάνω από την πόλη της Κοζάνης (γ.π. 40.3002635 , γ.μ. 21.800083) στις 9/8, με χρήση του επεξεργαστή WRFV3.7 και η σύγκριση με το TAPM

Τα παραπάνω διαγράμματα έγιναν στο πρώτο σημείο ύψους περίπου 15m. Από το Σχήμα 5.4.1, τα δυο λογισμικά διαπιστώνεται πως υπερεκτιμούν την θερμοκρασία από τις 00:00 – 05:00 UTC. Φαίνεται ότι τις πρωινές ώρες το TAPM δεν αντιλαμβάνεται την αύξηση της θερμοκρασίας στις (05:00 UTC) όπως το WRF, και συνεχίζει να υπολογίζει ψύξη Το TAPM υπερεκτιμά την θερμοκρασία τις μεσημεριανές και απογευματινές ώρες, (12:00-19:00 UTC) σε σχέση με το WRF, που προσεγγίζει ικανοποιητικά τις μετρήσεις..

Η WRF καμπύλη ταχυτήτων σύμφωνα και με το Σχήμα 5.4.2 φαίνεται να ακολουθεί τις μεταβολές όπως προκύπτουν από τα πειραματικά καθώς παρατηρούνται μέγιστα και ελάχιστα στα ίδια σχεδόν σημεία. Το TAPM έχει για τις ταχύτητες μια πιο ομαλή καμπύλη μικρότερου εύρους από το WRF, χωρίς να αντιλαμβάνεται το ίδιο τις μεταβολές.



Σχήμα 5.4.3: Καθ' ύψος κατανομή θερμοκρασιών πάνω από την πόλη της Κοζάνης (γ.π. 40.3002635 , γ.μ. 21.800083) στις 9/8, σε τρεις διαφορετικές ώρες της ημέρας, με χρήση του επεξεργαστή WRFV3.7 και η σύγκριση με το TAPM.



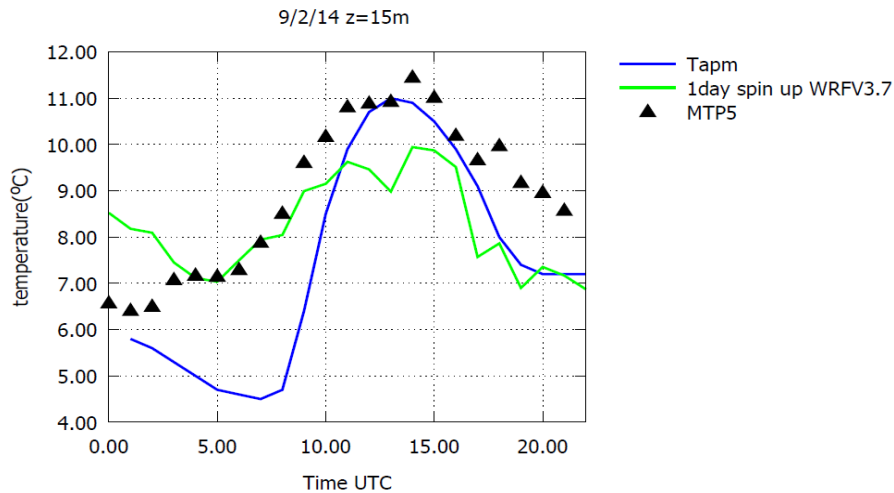
Σχήμα 5.4.4: Καθ' ύψος κατανομή ταχυτήτων πάνω από την πόλη της Κοζάνης (γ.π. 40.3002635 , γ.μ. 21.800083) στις 9/8, σε τρεις διαφορετικές ώρες της ημέρας, με χρήση του επεξεργαστή WRFV3.7 και η σύγκριση με το TAPM.

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.4.3, για τις θερμοκρασίες στις 06:00 UTC, φαίνεται πως το WRF ακολουθεί τη μορφή που έχει και η πειραματική καμπύλη αλλά αποκλίνει κατά $1,5^{\circ}\text{C}$ σχεδόν σε όλο το ύψος. Το TAPM φαίνεται να αποκλίνει περισσότερο με το ύψος, αλλά χαμηλότερα είναι πιο κοντά με τα πειραματικά. Στις 12:00 UTC η διαφορά αυτή ελαττώνεται και για τα δυο λογισμικά με το TAPM να πλησιάζει περισσότερο τα πειραματικά μεγέθη του MTP5. Στις 18:00 UTC η καμπύλη του WRF σχεδόν ταυτίζεται με τα πειραματικά μεγέθη, ενώ το TAPM αποκλίνει σημαντικά.

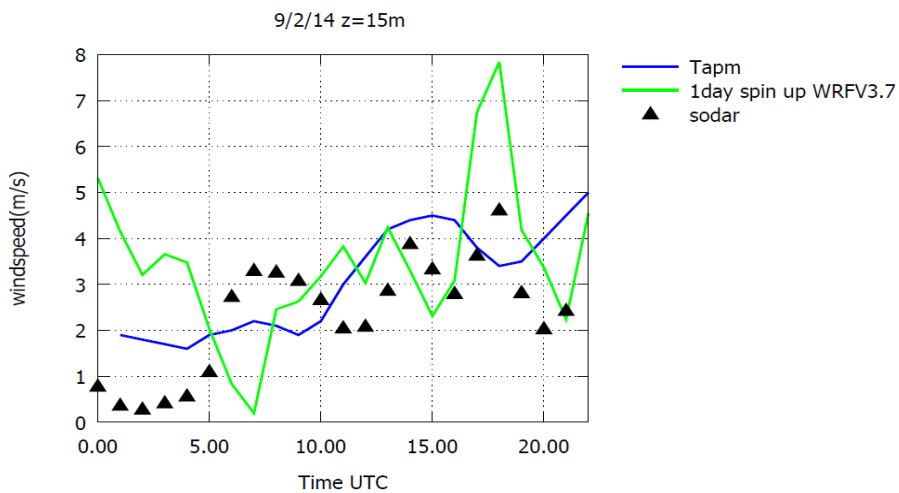
Για τις ταχύτητες του Σχήματος 5.4.4, φαίνεται πως στις 06:00 UTC, το WRF πλησιάζει περισσότερο τα αποτελέσματα του SODAR σε σχέση με το TAPM που υπολογίζει υπερβολικά υψηλές ταχύτητες συναρτήσει του ύψους. Στις 12:00 UTC τα δυο λογισμικά συμφωνούν στα πρώτα 70m και αποκλίνουν ψηλότερα, αλλά φαίνεται πως προσεγγίζουν καλύτερα τα πειραματικά μεγέθη. Στις 18:00 UTC παρατηρούνται και πάλι μεγάλες αποκλίσεις, με το TAPM και το WRF να υπερεκτιμούν τις ταχύτητες στα πρώτα 100m, το WRF να πλησιάζει και το TAPM συνεχίζει να αποκλίνει.

Από τα Σχήματα 5.4.3 και 5.4.4, σε ότι αφορά την μεταβολή της κατάστασης της ατμόσφαιρας κατά την διάρκεια του 24ώρου, παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των δυο λογισμικών. Στις 06:00 UTC ή 08:00 ώρα Ελλάδας, το WRF φαίνεται να υπολογίζει μια υπερυψωμένη αναστροφή όπως προβλέπεται. Το στρώμα αστάθειας φτάνει τα 150m, έπειτα το στρώμα της αναστροφής όπου κυριαρχεί ευστάθεια, έχει μια βάση τα 150m περίπου και το ύψος της αγγίζει τα 350m, ενώ πάνω από τα 350m επικρατεί αστάθεια. Σε αντίθεση με το WRF, το TAPM φαίνεται να υπολογίζει αναστροφή εδάφους με ευστάθεια ατμόσφαιρας μέχρι και τα 320m υψόμετρο, όπου και επιστρέφει σε αστάθεια. Παρά τις διαφορές στην θερμοκρασία, το WRF ακολουθεί καλύτερα το προφίλ των πειραματικών μεγεθών του MTP5. Στις 12:00 UTC ή 14:00 ώρα Ελλάδας, υπάρχει μια ικανοποιητική προσέγγιση της κατάστασης της ατμόσφαιρας και από τα δυο λογισμικά, καθώς παρατηρείται χαμηλά ελάχιστη ως και καθόλου αστάθεια, ενώ υψηλότερα επικρατεί ουδέτερη κατάσταση. Στις 18:00 UTC ή 20:00 ώρα Ελλάδας, το WRF υπολογίζει μια αναστροφή εδάφους, όπως προβλέπεται. Το στρώμα αναστροφής ανέρχεται μέχρι τα 100m όπως περίπου προκύπτει και από το MTP5. Το TAPM αντιθέτως, δεν έχει αντιληφθεί καθόλου αυτή την αναστροφή εδάφους καθώς συνεχίζει να υπολογίζει ασταθή κατάσταση ατμόσφαιρας.

Εδώ παρουσιάζονται επίσης τα ίδια διαγράμματα σύγκρισης με το λογισμικό TAPM για τον Φεβρουάριο. Επιλέγεται η καλύτερη προσέγγιση με χρήση των οριακών συνθηκών μιας ημέρας. (1 day spin up)



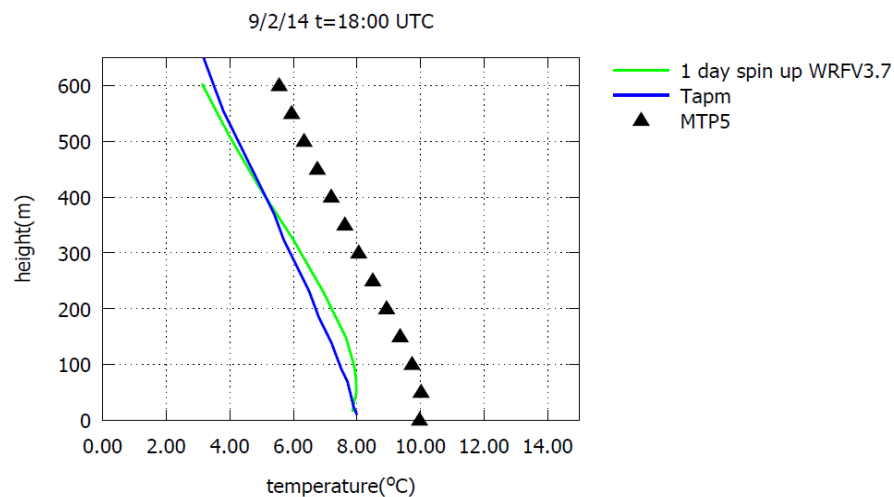
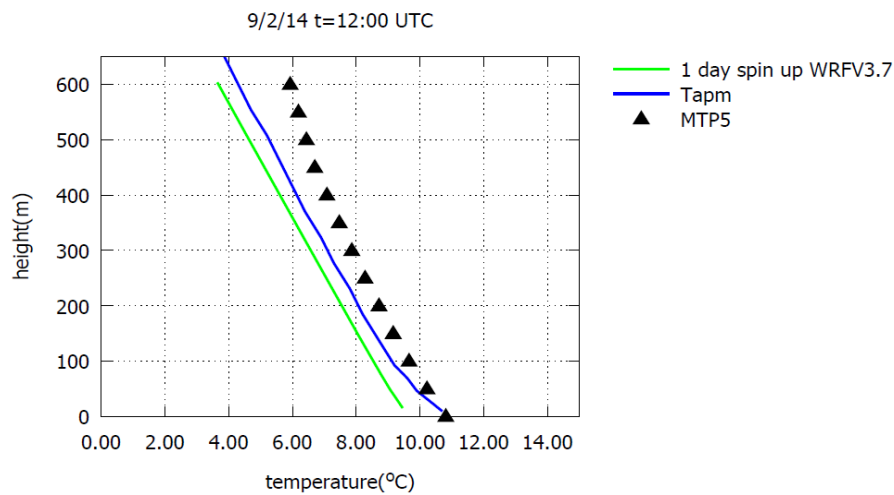
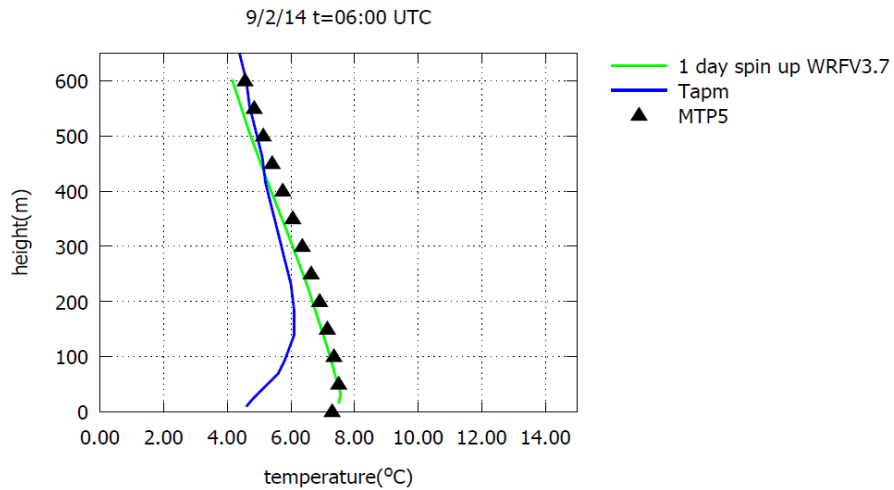
Σχήμα 5.4.5: Κατανομή θερμοκρασιών για το πρώτο σημείο κατά την διάρκεια του 24ώρου πάνω από την πόλη της Κοζάνης (γ.π. 40.3002635 , γ.μ. 21.800083) στις 9/2, με χρήση του επεξεργαστή WRFV3.7 και η σύγκριση με το TAPM



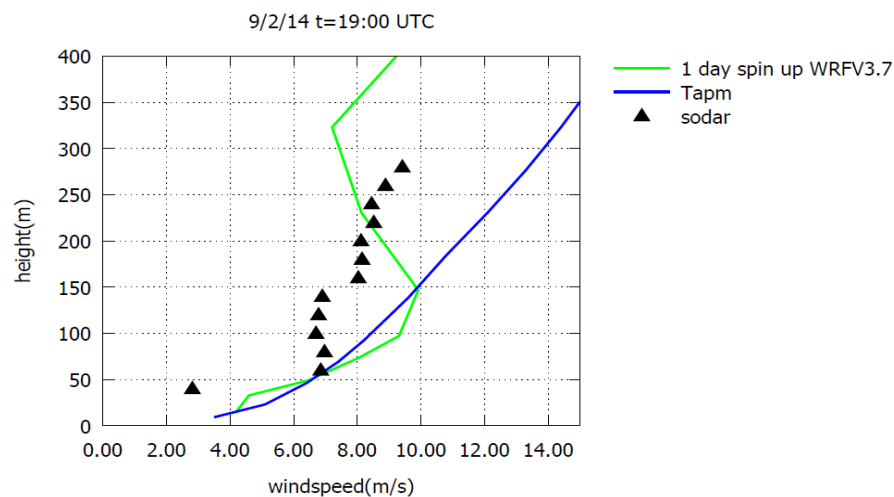
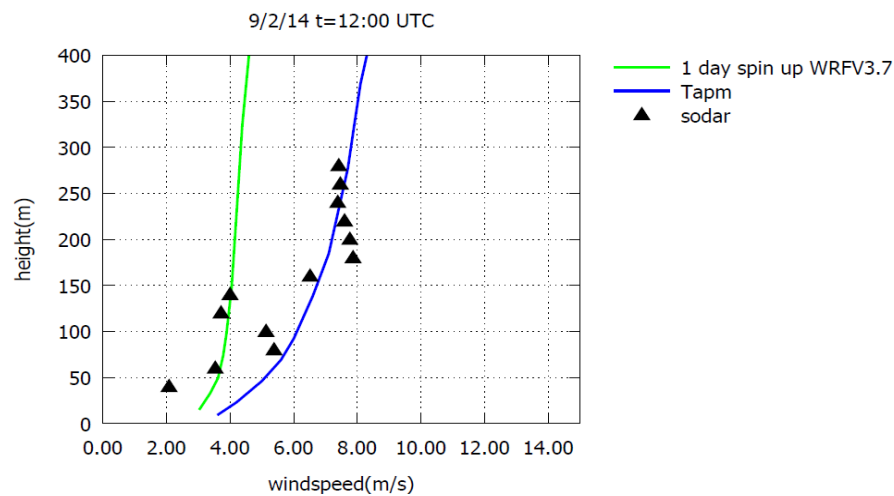
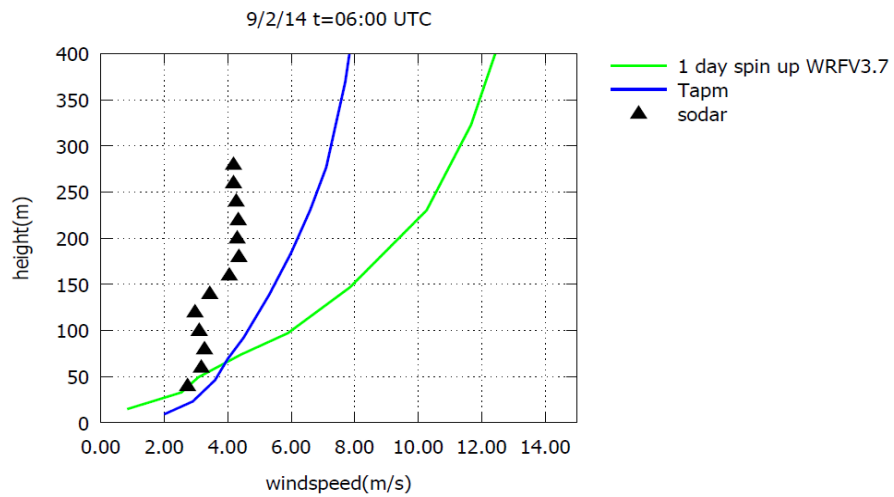
Σχήμα 5.4.6: Κατανομή θερμοκρασιών για το πρώτο σημείο κατά την διάρκεια του 24ώρου πάνω από την πόλη της Κοζάνης (γ.π. 40.3002635 , γ.μ. 21.800083) στις 9/2, με χρήση του επεξεργαστή WRFV3.7 και η σύγκριση με το TAPM

Από το Σχήμα 5.4.5 της κατανομής θερμοκρασιών, φαίνεται πως το TAPM τις πολύ πρωινές ώρες αποκλίνει σημαντικά σε αντίθεση με το WRF που ενώ αρχικά (00:00 – 03:00 UTC) υπερεκτιμά τις θερμοκρασίες, ύστερα τις προσεγγίζει πολύ ικανοποιητικά (04:00 – 09:00 UTC). Από τις 10:00 – 15:00 UTC το TAPM προσεγγίζει καλύτερα τις μετρούμενες θερμοκρασίες του MTP5, ενώ το WRF αποκλίνει τουλάχιστον $1,5^{\circ}\text{C}$. Μετά τις 16:00 UTC φαίνεται πως και τα δυο λογισμικά υποεκτιμούν τις θερμοκρασίες.

Για τις ταχύτητες τον Φεβρουάριο φαίνεται από το Σχήμα 5.4.6, πως εδώ και τα δυο λογισμικά αποκλίνουν από το προφίλ των πειραματικών μετρήσεων του SODAR, αλλά αντιλαμβάνονται τις μεταβολές του. Το WRF παρ' όλα αυτά υπολογίζει ταχύτητες σε ένα μεγαλύτερο εύρος και άλλοτε υποεκτιμά (05:00 – 08:00 UTC) και άλλοτε υπερεκτιμά (17:00 – 19:00 UTC) σε σχέση με το TAPM.



Σχήμα 5.4.7: Καθ' ύψος κατανομή θερμοκρασιών πάνω από την πόλη της Κοζάνης (γ.π. 40.3002635 , γ.μ. 21.800083) στις 9/2, σε τρεις διαφορετικές ώρες της ημέρας, με χρήση του επεξεργαστή WRFV3.7 και η σύγκριση με το TAPM.



Σχήμα 5.4.8: Καθ' ύψος κατανομή θερμοκρασιών πάνω από την πόλη της Κοζάνης (γ.π. 40.3002635 , γ.μ. 21.800083) στις 9/2, σε τρεις διαφορετικές ώρες της ημέρας, με χρήση του επεξεργαστή WRFV3.7 και η σύγκριση με το TAPM.

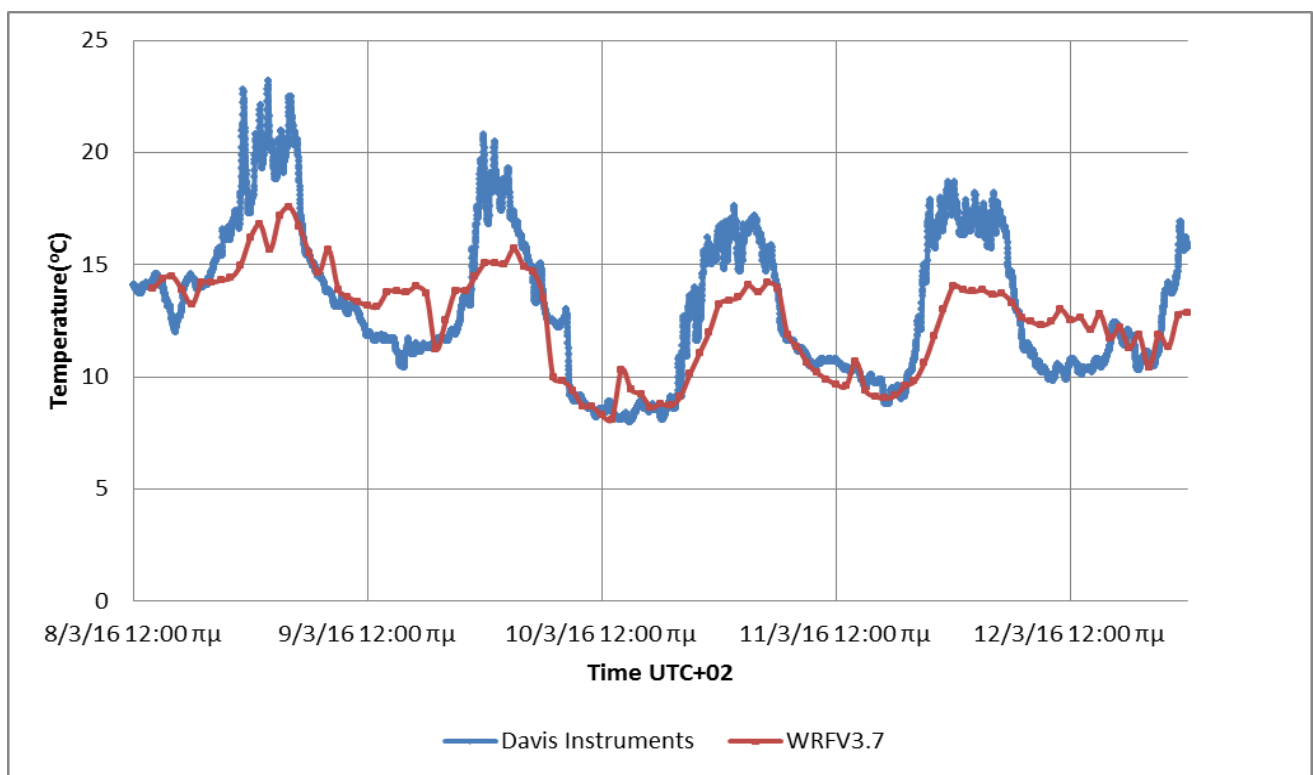
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4.7, για τις θερμοκρασίες στις 06:00 UTC, το WRF ακολουθεί επακριβώς την καμπύλη MTP5 σε όλο το ύψος μέχρι και τα 600m, ενώ το TAPM αποκλίνει σημαντικά στα πρώτα 200m έως και 3°C. Στις 12:00 UTC παρ' όλα αυτά φαίνεται πως το TAPM προσεγγίζει καλύτερα την καμπύλη του MTP5 και το WRF να αποκλίνει για τουλάχιστον 1,8°C σε όλο σχεδόν το ύψος. Στις 18:00 UTC όμως και τα δυο λογισμικά υποεκτιμούν τις θερμοκρασίες για τουλάχιστον 2°C, με το WRF να προσεγγίζει λίγο καλύτερα το προφίλ του MTP5.

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.4.8, για τις ταχύτητες στις 06:00 UTC, φαίνεται πως το WRF συμφωνεί με την καμπύλη του SODAR για τα πρώτα 50m και έπειτα αρχίζει να αποκλίνει σημαντικά. Το TAPM σε μεγαλύτερα ύψη πλησιάζει περισσότερο τα αποτελέσματα του SODAR. Στις 12:00 UTC φαίνεται πως το TAPM προσεγγίζει καλύτερα τις μετρήσεις του SODAR σε μεγαλύτερα ύψη σε σχέση με το WRF, ενώ κάτω των 150m τα λογισμικά είναι πιο κοντά. Στις 19:00 UTC και τα δυο λογισμικά είναι αρχικά κοντά με το SODAR, έπειτα αποκλίνουν μέχρι και τα 150m, σημείο όπου το TAPM συνεχίζει να αποκλίνει ενώ το WRF αρχίζει να πλησιάζει το SODAR ξανά.

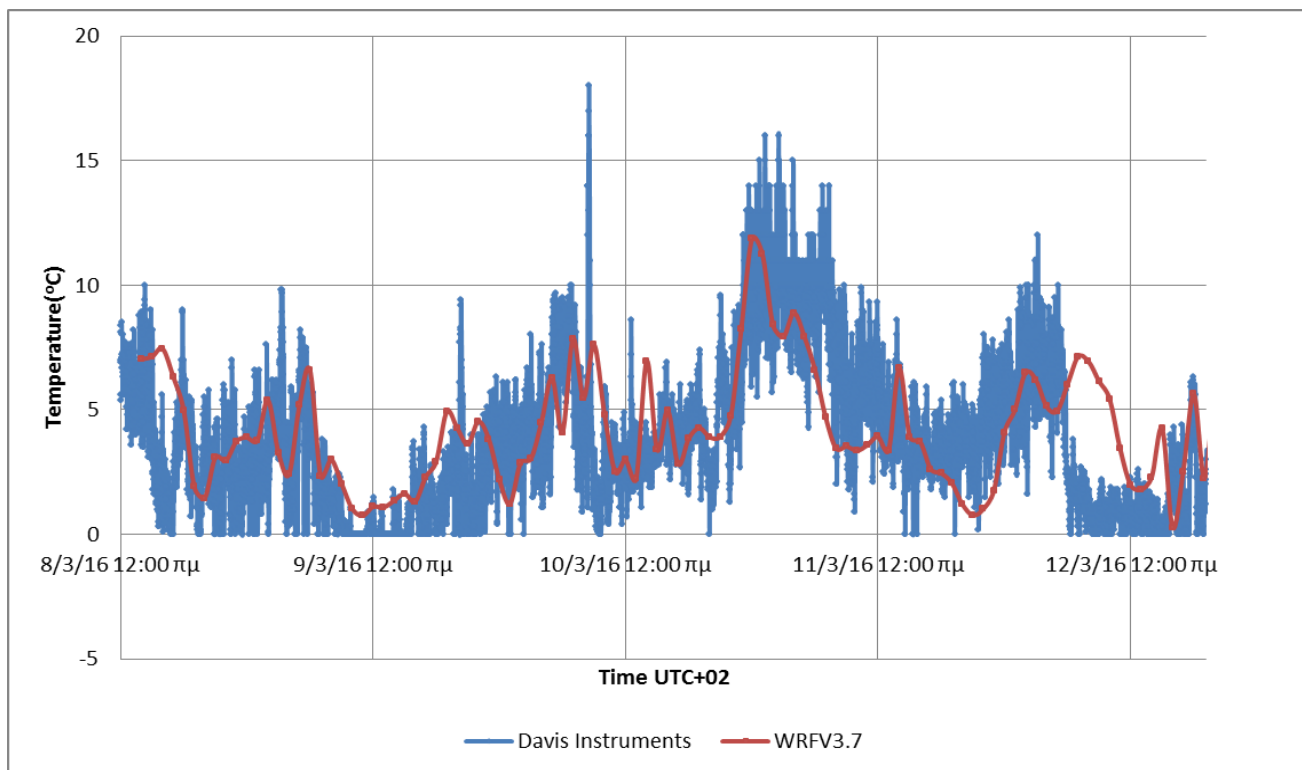
Σε ότι αφορά την μεταβολή της κατάστασης της ατμόσφαιρας κατά την διάρκεια του 24ώρου, σύμφωνα με τα Σχήματα 5.4.7 και 5.4.8, δεν παρατηρούνται και πολύ μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των δυο λογισμικών. Πιο συγκεκριμένα στις 06:00 UTC ή 08:00 ώρα Ελλάδας, φαίνεται πως το WRF υπολογίζει μια πολύ μικρή, σχεδόν μηδενική αναστροφή εδάφους όπως ακριβώς και το MTP5 ενώ πιο ψηλά επικρατεί αστάθεια. Το TAPM φαίνεται να υπολογίζει αναστροφή εδάφους με ευστάθεια ατμόσφαιρας μέχρι και τα 150m υψόμετρο, όπου και επιστρέφει σε αστάθεια. Το WRF εδώ φαίνεται να ακολουθεί καλύτερα το προφίλ των πειραματικών μεγεθών του MTP5. Στις 12:00 UTC ή 14:00 ώρα Ελλάδας, επικρατεί μια ικανοποιητική προσέγγιση της κατάστασης της ατμόσφαιρας και από τα δυο λογισμικά. Δεν παρατηρούνται αλλαγές στην θερμοβαθμίδα, σε όλο το ύψος της προσομοίωσης. Στις 18:00 UTC ή 20:00 ώρα Ελλάδας, το WRF υπολογίζει μια αναστροφή εδάφους, όπως προβλέπεται. Το στρώμα αναστροφής ανέρχεται μέχρι τα 80m, ενώ για το MTP5 το στρώμα υπολογίζεται λίγο πιο χαμηλά, στα 50m. Το TAPM αντιθέτως, συνεχίζει να υπολογίζει ασταθή κατάσταση ατμόσφαιρας.

5.5 WRF και Davis Instruments - Περιπτώσεις Αθήνας (Setup_3)

Στα παρακάτω διαγράμματα γίνεται η σύγκριση των προσομοιώσεων του λογισμικού WRF με το Setup_3, και των διαθέσιμων πειραματικών μετρήσεων του μετεωρολογικού σταθμού Davis Instruments εγκατεστημένου στο κτίριο ΑΝΥΜ εντός Πολυτεχνειούπολης. Παρουσιάζονται τα προφίλ θερμοκρασιών και ταχυτήτων κατά την διάρκεια κάποιων ημερών για τον Μάρτιο, για τον Απρίλιο, για τον Μάιο και τον Ιούνιο του 2016.



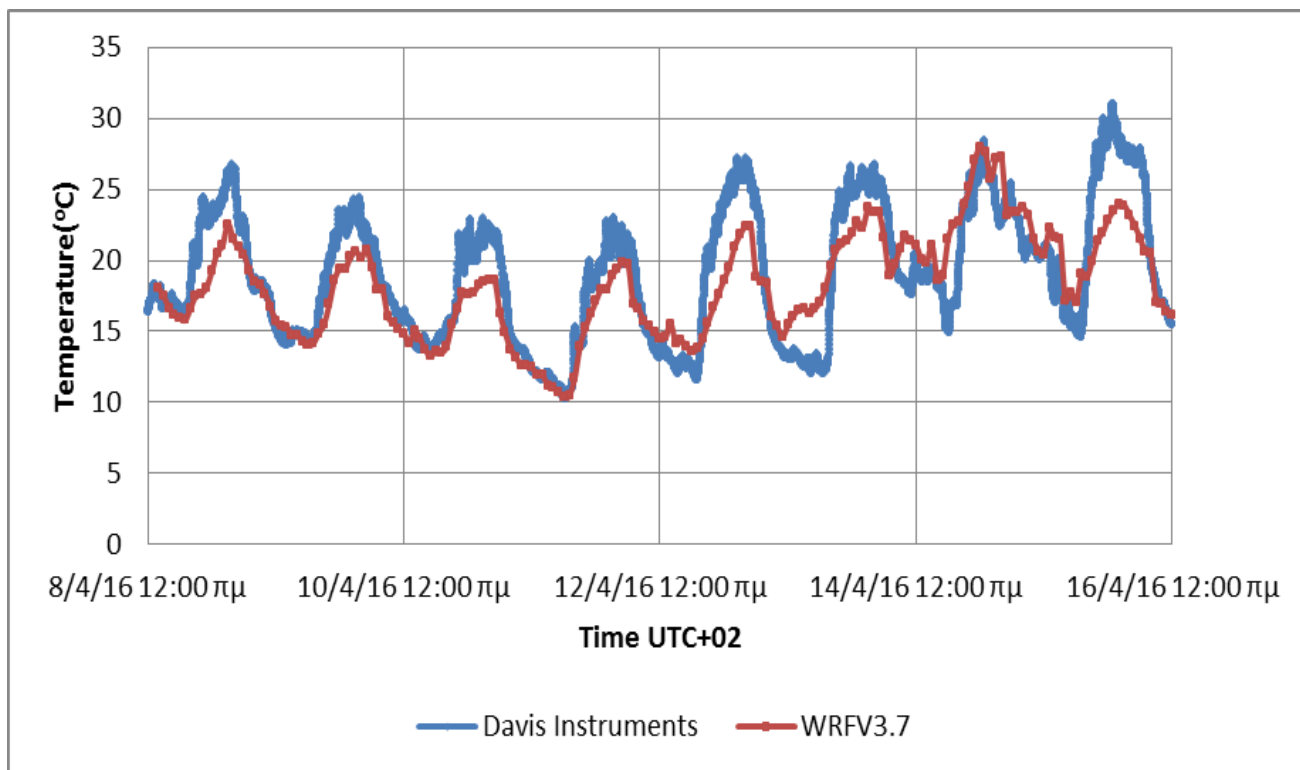
Σχήμα 5.5.1: Κατανομή θερμοκρασιών για το πρώτο σημείο κατά την διάρκεια 5 ημερών του Μαρτίου, πάνω από το κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ (γ.π. 37.97453 , γ.μ. 23.76828), με χρήση του επεξεργαστή WRFV3.7 και η σύγκριση με το μετεωρολογικό σταθμό Davis Instruments



Σχήμα 5.5.2: Κατανομή ταχυτήτων για το πρώτο σημείο κατά την διάρκεια 5 ημερών του Μαρτίου, πάνω από το κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ (γ.π. 37.97453 , γ.μ. 23.76828), με χρήση του επεξεργαστή WRFV3.7 και η σύγκριση με το μετεωρολογικό σταθμό Davis Instruments

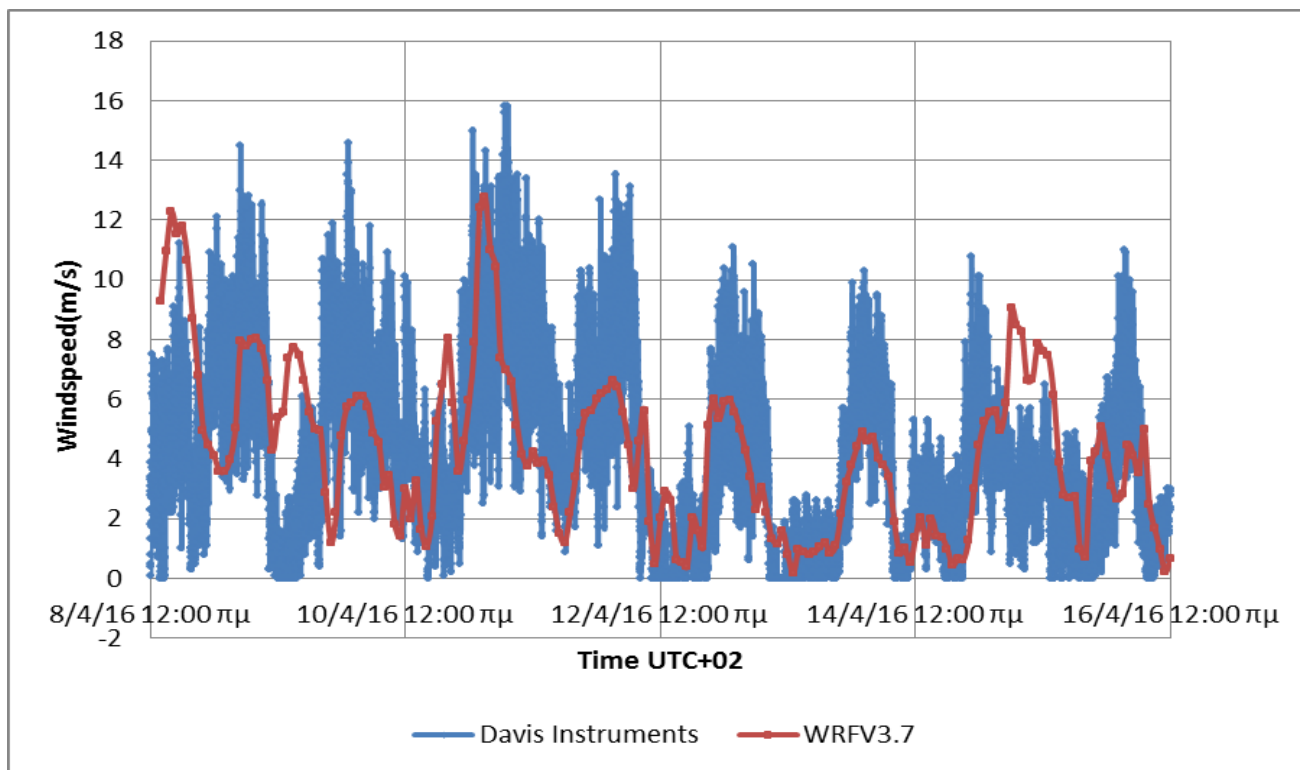
Στο Σχήμα 5.5.1 παρουσιάζεται η κατανομή των θερμοκρασιών πάνω από το κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ για 5 ημέρες του Μαρτίου. Παρατηρείται μια υποεκτίμηση των θερμοκρασιών από το λογισμικό WRF κατά την διάρκεια της μέρας και του μεσημεριού (τυπικά 09:00 – 16:00) και για τις 5 ημέρες. Το WRF φαίνεται να προσεγγίζει καλύτερα τις απογευματινές και πρώτες βραδινές ώρες (16:00-23:00). Για τις νυχτερινές ώρες μετά τις 23:00 και τις πρώτες πρωινές ώρες υπάρχει σαφής υπερεκτίμηση.

Στο Σχήμα 5.5.2 παρουσιάζεται η κατανομή των ταχυτήτων πάνω από το κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ για 5 ημέρες του Μαρτίου. Από το διάγραμμα, φαίνεται ότι από τις 8/3 02:00 – 9/3 19:00 το λογισμικό WRF υποεκτιμά τις ταχύτητες. Παρατηρείται μια ικανοποιητική προσέγγιση του λογισμικού σε ό,τι αφορά τις μεταβολές για τις 10/3/16. Τις άλλες μέρες είτε φαίνεται να υπερεκτιμά τα μεγέθη (11/3 18:00 – 12/3 14:00 , 12/3 10:00 – 12/3 20:00) και άλλοτε να υποεκτιμά (11/3 03:00 – 11/3 12:00).



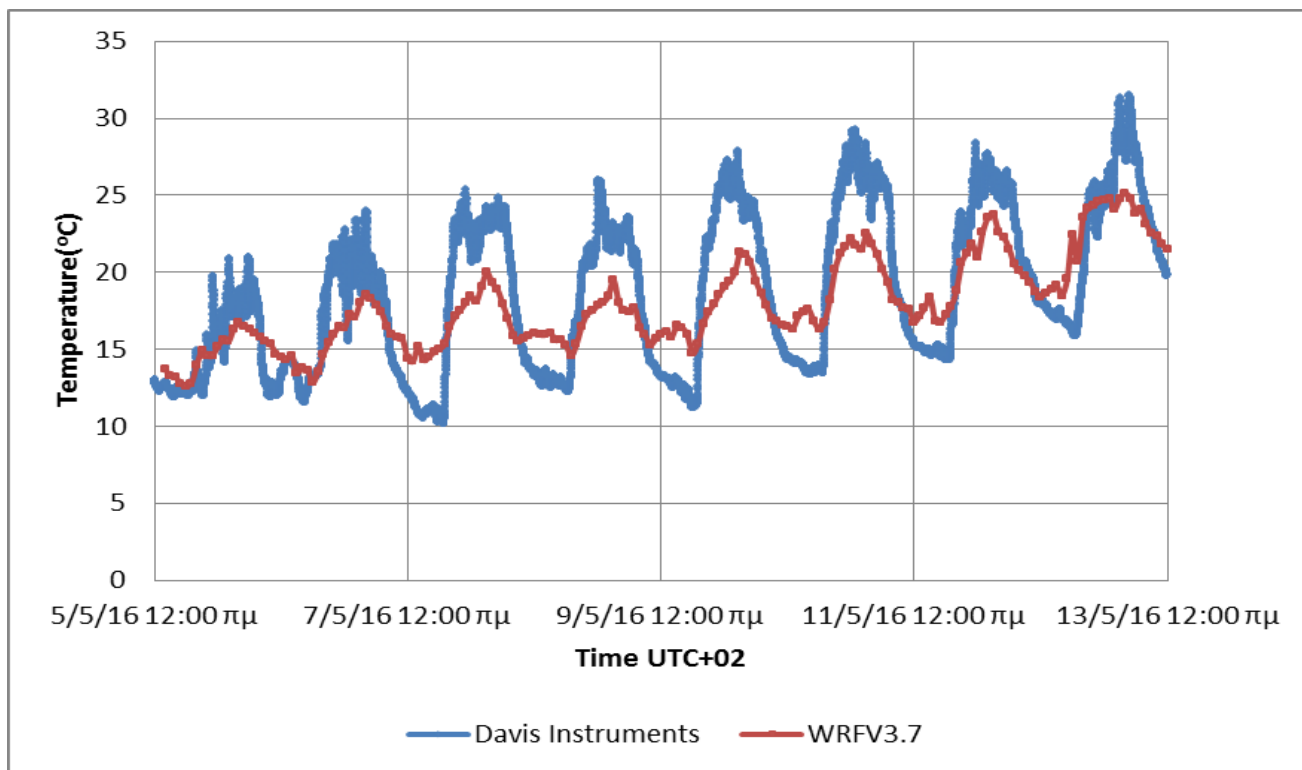
Σχήμα 5.5.3: Κατανομή θερμοκρασιών για το πρώτο σημείο κατά την διάρκεια 7 ημερών του Απριλίου, πάνω από το κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ (γ.π. 37.97453 , γ.μ. 23.76828), με χρήση του επεξεργαστή WRFV3.7 και η σύγκριση με το μετεωρολογικό σταθμό Davis Instruments

Στο Σχήμα 5.5.3 παρουσιάζονται οι κατανομές των θερμοκρασιών πάνω από το κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ, για 7 ημέρες τον μήνα Απρίλιο. Από το διάγραμμα φαίνεται πως το λογισμικό προσεγγίζει ικανοποιητικά τις μετρήσεις θερμοκρασιών του σταθμού καθώς για τις ημερομηνίες 8/4 03:00 – 9/4 11:00, τις 9/4 18:00 – 10/4 09:00, τις 10/4 18:00 – 11/4 22:00 και τις 14/4 20:00 – 15/4 02:00, οι καμπύλες ταυτίζονται. Το λογισμικό φαίνεται να υποεκτιμά τα τις θερμοκρασίες κατά την διάρκεια της μέρας και του μεσημεριού (τυπικά 09:00 – 16:00), ή να υπερεκτιμά για τις νυχτερινές ώρες μετά τις 23:00 έως και τις πρώτες πρωινές.



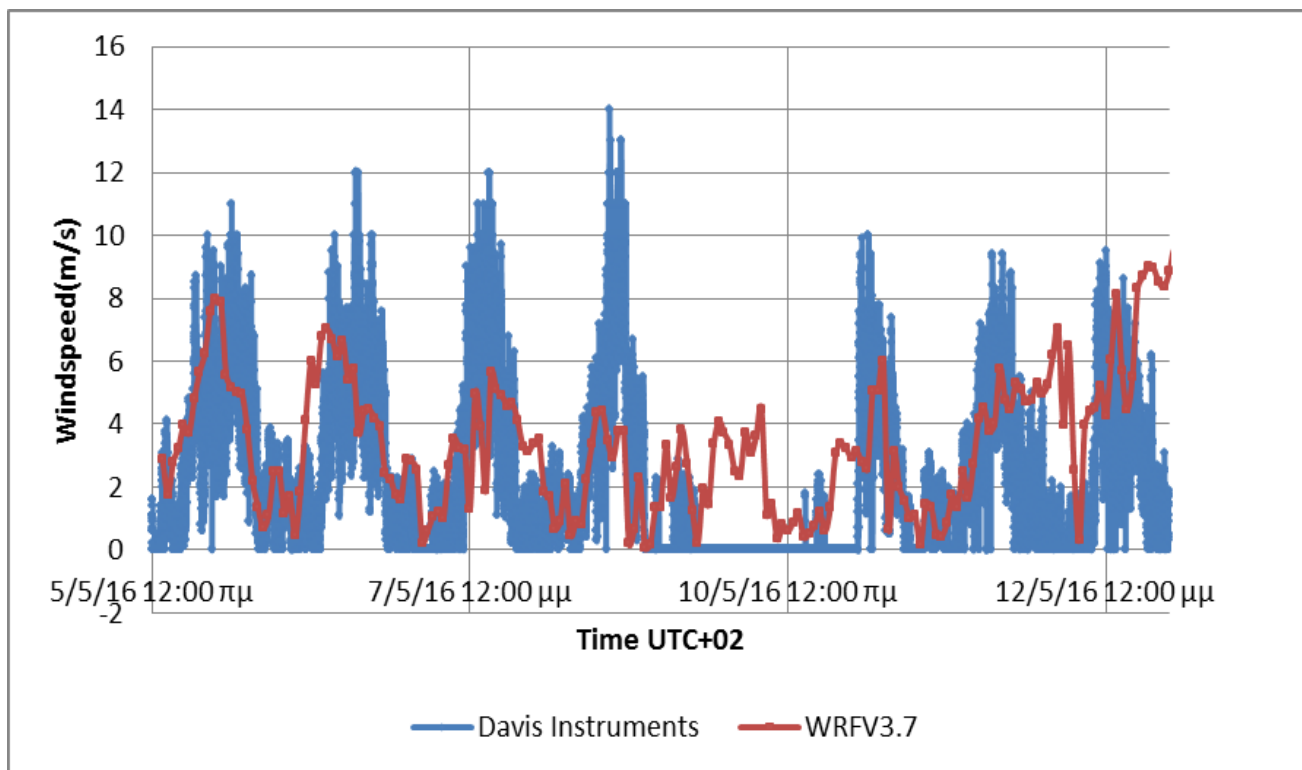
Σχήμα 5.5.4: Κατανομή ταχυτήτων για το πρώτο σημείο κατά την διάρκεια 7 ημερών του Απριλίου, πάνω από το κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ (γ.π. 37.97453 , γ.μ. 23.76828), με χρήση του επεξεργαστή WRFV3.7 και η σύγκριση με το μετεωρολογικό σταθμό Davis Instruments

Στο Σχήμα 5.5.4 παρουσιάζονται οι κατανομές των ταχυτήτων πάνω από το κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ κατά την διάρκεια 7 ημερών για τον μήνα Απρίλιο. Από το διάγραμμα φαίνεται πως το λογισμικό WRF αντιλαμβάνεται το ίδιο τις μεταβολές των ταχυτήτων που μετρά ο σταθμός καθώς παρατηρούνται μέγιστα και ελάχιστα στα ίδια σημεία. Φαίνεται πως το λογισμικό υποεκτιμά τις ταχύτητες σχεδόν όλες τις ημέρες του μήνα, με μια καλύτερη προσέγγιση του εύρους ταχυτήτων για τις μεσημεριανές ώρες στις 10/4.



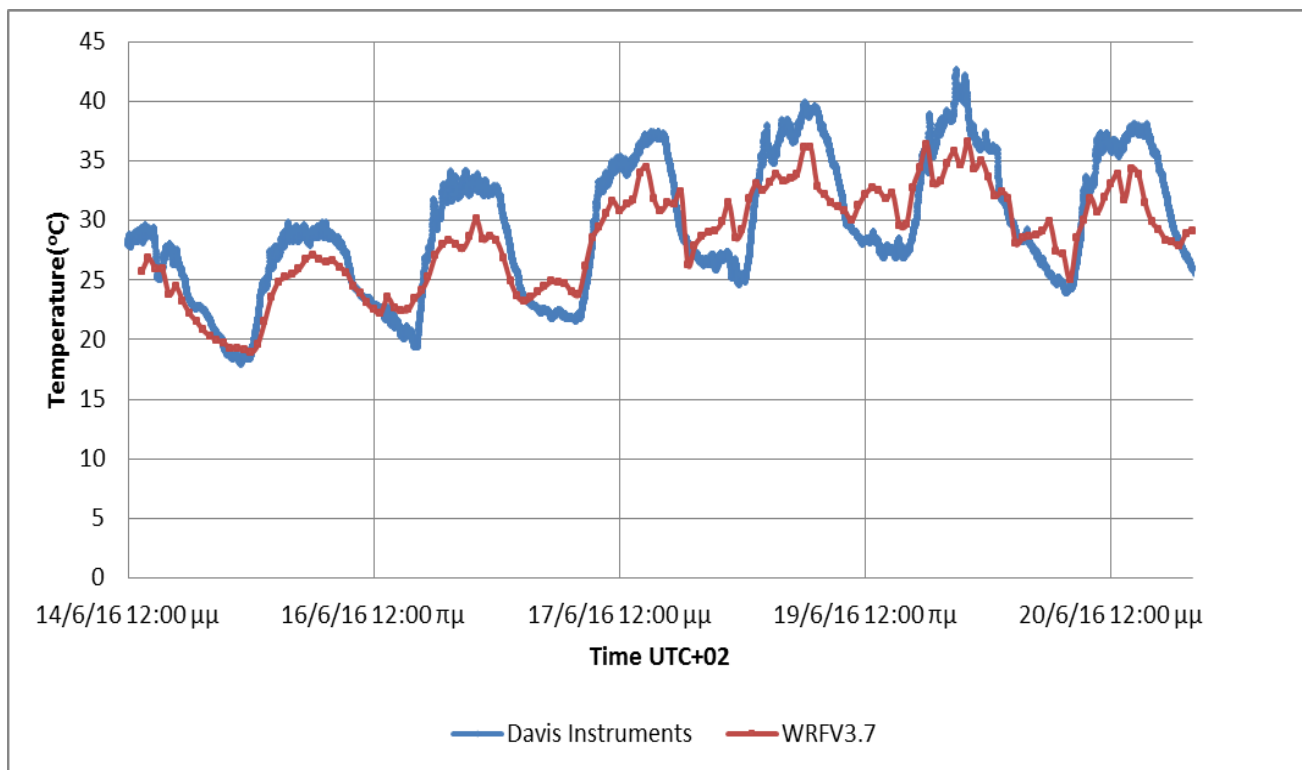
Σχήμα 5.5.5: Κατανομή θερμοκρασιών για το πρώτο σημείο κατά την διάρκεια 7 ημερών του Μαΐου, πάνω από το κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ (γ.π. 37.97453 , γ.μ. 23.76828), με χρήση του επεξεργαστή WRFV3.7 και η σύγκριση με το μετεωρολογικό σταθμό Davis Instruments

Στο Σχήμα 5.5.5 παρουσιάζονται οι κατανομές των θερμοκρασιών πάνω από το κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ, για 7 ημέρες τον μήνα Μάιο. Κατά την διάρκεια των δυο πρώτων ημερών 5/5 – 6/5 21:00, φαίνεται πως το λογισμικό WRF προσεγγίζει πολύ ικανοποιητικά τις μετρήσεις θερμοκρασίας που δίνει ο σταθμός. Έπειτα ναι μεν το λογισμικό ακολουθεί την ανοδική πορεία της θερμοκρασίας όπως φαίνεται στο διάγραμμα αλλά με μια προφανή υποεκτίμηση κατά την διάρκεια της μέρας και του μεσημεριού (09:00 – 16:00), και μια υπερεκτίμηση για τις νυχτερινές ώρες μετά τις 23:00 και για τις πρώτες πρωινές.



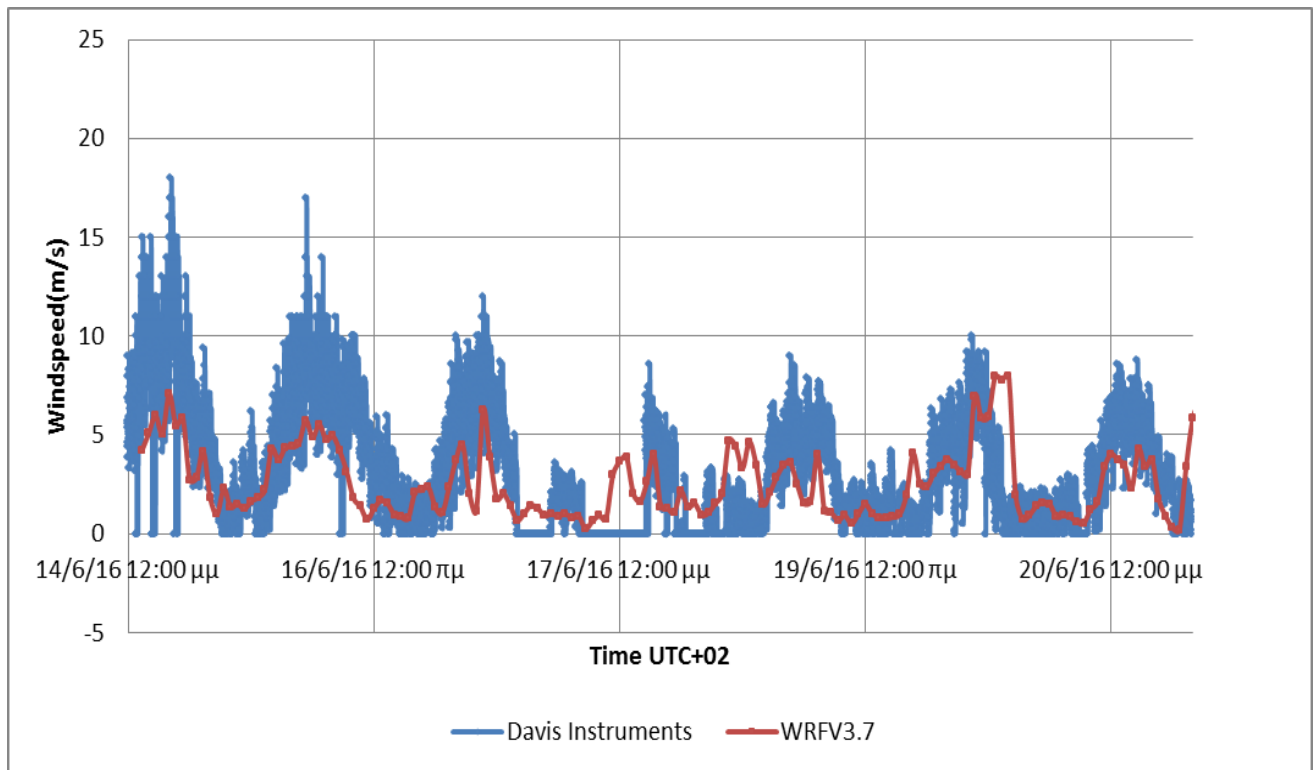
Σχήμα 5.5.6: Κατανομή ταχυτήτων για το πρώτο σημείο κατά την διάρκεια 7 ημερών του Μαΐου, πάνω από το κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ (γ.π. 37.97453 , γ.μ. 23.76828), με χρήση του επεξεργαστή WRFV3.7 και η σύγκριση με το μετεωρολογικό σταθμό Davis Instruments

Στο Σχήμα 5.5.6 παρουσιάζονται οι κατανομές των ταχυτήτων πάνω από το κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ για 7 ημέρες τον μήνα Μάιο. Παρά το γεγονός ότι το λογισμικό WRF αντιλαμβάνεται τις παραπάνω μεταβολές του μετεωρολογικού σταθμού Davis Instruments, εντούτοις φαίνεται πως και εδώ υποεκτιμά κατά πολύ τις ταχύτητες. Τις ημερομηνίες 9/5 - 10/5 φαίνεται πως ο μετεωρολογικός σταθμός έχει καταγράψει εσφαλμένες μετρήσεις.



Σχήμα 5.5.7: Κατανομή θερμοκρασιών για το πρώτο σημείο κατά την διάρκεια 7 ημερών του Ιουνίου, πάνω από το κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ (γ.π. 37.97453 , γ.μ. 23.76828), με χρήση του επεξεργαστή WRFV3.7 και η σύγκριση με το μετεωρολογικό σταθμό Davis Instruments

Στο Σχήμα 5.5.7 παρουσιάζονται οι κατανομές των θερμοκρασιών πάνω από το κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ, για 7 ημέρες τον μήνα Ιούνιο. Εδώ φαίνεται πως το λογισμικό WRF ναι μεν υποεκτιμά τις θερμοκρασίες τις μεσημεριανές ώρες, αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό σε σχέση με τους προηγούμενους μήνες όπως ο Μάρτιος και ο Μάιος, που παρατηρήθηκαν διαφορές έως και 3.5 – 4°C. Και εδώ υπάρχει μια υπερεκτίμηση των θερμοκρασιών για τις νυκτερινές ώρες μετά τις 23:00 και έως τις 06:00 το πρωί.



Σχήμα 5.5.8: Κατανομή ταχυτήτων για το πρώτο σημείο κατά την διάρκεια 7 ημερών του Ιουνίου, πάνω από το κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ (γ.π. 37.97453 , γ.μ. 23.76828), με χρήση του επεξεργαστή WRFV3.7 και η σύγκριση με το μετεωρολογικό σταθμό Davis Instruments

Στο Σχήμα 5.5.8 παρουσιάζονται οι κατανομές των ταχυτήτων πάνω από το κτίριο ΑΝΥΜ,ΕΜΠ για 7 ημέρες τον μήνα Ιούνιο. Παρατηρείται ίδια εικόνα με αυτήν των προηγούμενων μηνών. Οι WRF προσομοιώσεις ακολουθούν το προφίλ των ταχυτήτων με σημαντική υποεκτίμηση τις περισσότερες μέρες.

Κεφάλαιο 6 . Συμπεράσματα

Σε αυτήν την διπλωματική εργασία, έγινε μια πρώτη προσέγγιση της χρήσης του λογισμικού WRF για εξαγωγή αποτελεσμάτων σχετικών με την αριθμητική πρόγνωση του καιρού και της μέτρησης διαφόρων παραμέτρων αυτού. Κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, έγιναν απλές προσομοιώσεις παραμετρικής ευαισθησίας του λογισμικού και εν συνεχεία προσομοιώσεις που είχαν σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις από τα μετεωρολογικά όργανα SODAR και MTP5 για την περιοχή της Κοζάνης, καθώς επίσης και μια σύγκριση με το λογισμικό TAPM που χρησιμοποιήθηκε εκεί.

Πέραν όμως αυτών δόθηκε έμφαση στην επιχειρησιακή εφαρμογή αριθμητικής πρόγνωσης που επιτελείται μέσω αυτοματοποιημένης διαδικασίας και επιτυγχάνεται μέσω αλγορίθμου κλήσης εντολών λειτουργικού συστήματος. Μέσω της παραπάνω διαδικασίας δίνεται η δυνατότητα προγνώσεων σε βάθος χρόνου 2 ημερών ενώ διευκολύνεται και η σύγκριση με τα αποτελέσματα του μετεωρολογικού ιστού Davis Instruments που εγκαταστάθηκε για λόγους διπλωματικής και όχι μόνο, στην οροφή του κτιρίου ΑΝΥΜ,ΕΜΠ.

Οι προσομοιώσεις που αφορούν το πλέγμα του Setup_2 στην Κοζάνη για τις 9/8/2014 είναι σε γενικές γραμμές πολύ ικανοποιητικές είτε γίνεται η χρήση του πρότυπου αστικού θόλου (UCM) είτε όχι, με αποκλίσεις να παρουσιάζονται στα μεγέθη των ταχυτήτων, καθώς το WRF υπερεκτιμά σε σχέση με τις μετρήσεις. Με εφαρμογή του ίδιου πλέγματος για τις 9/2/2014 στην Κοζάνη παρατηρείται μια υποεκτίμηση των θερμοκρασιών για όλη την διάρκεια της μέρας, όσον αφορά τις περιπτώσεις χρήσης spin up 2 ημερών. Η διαφορά αυτή καλύπτεται ελαφρώς με την χρήση οριακών συνθηκών μιας ημέρας (1 day spin up). Οι αποκλίσεις στις ταχύτητες είναι λιγότερες τον Φεβρουάριο με την χρήση του πρότυπου αστικού θόλου σε σχέση με τον Αύγουστο.

Όσον αφορά τις συγκρίσεις των δυο λογισμικών, φαίνεται πως για τις 9/8/2014 WRF και TAPM προσεγγίζουν ικανοποιητικά το προφίλ θερμοκρασιών κατά την διάρκεια της μέρας. Για τις ταχύτητες πέραν του γεγονότος ότι και τα δυο λογισμικά υπερεκτιμούν, το WRF φαίνεται να αντιλαμβάνεται καλύτερα τις μεταβολές ακολουθώντας το προφίλ τους. Για τις 9/2/2014 φαίνεται πως το WRF

προσεγγίζει καλύτερα το προφίλ θερμοκρασιών τις πολύ νυχτερινές και πρώτες πρωινές ώρες την ώρα που το TAPM υποεκτιμά σημαντικά. Αντιθέτως το TAPM προσεγγίζει ικανοποιητικά τις θερμοκρασίες τις μεσημεριανές ώρες, ενώ το WRF τις υποεκτιμά. Σχετικά με τις ταχύτητες η εφαρμογή του UCM στο λογισμικό WRF φαίνεται να υπερέχει έναντι των απλών εξισώσεων που χρησιμοποιεί το TAPM και για τις δυο περιπτώσεις στην Κοζάνη.

Η γενικότερη εικόνα για τις συγκρίσεις του λογισμικού WRF του Setup_3, με τον μετεωρολογικό ιστό Davis Instruments στο κτίριο ANΥΜ,ΕΜΠ, για τα διαγράμματα που έγιναν για κάποιες ημέρες τον Μάρτιο, τον Απρίλιο τον Μάιο και τον Ιούνιο, δεν είναι απόλυτα ικανοποιητική. Παρατηρείται μια υποεκτίμηση της θερμοκρασίας και στις παραπάνω περιπτώσεις, ιδίως κατά την διάρκεια της μέρας και κάποιων ωρών του μεσημεριού (09:00 – 16:00). Υπάρχουν όμως και μέρες που τα αποτελέσματα του λογισμικού ταυτίζονται με τις μετρήσεις, κάτι που συμβαίνει συνήθως μετά το απόγευμα όπως τον Μάρτιο και σχεδόν όλες τις βραδινές και πρώτες πρωινές ώρες του Απριλίου. Σε άλλες περιπτώσεις όπως τον Μάιο το WRF υπερεκτιμά τις θερμοκρασίες τις πρώτες πρωινές ώρες. Για τις 7 ημέρες του μήνα Ιουνίου φαίνεται πως αυτές οι υποεκτιμήσεις της θερμοκρασίας τις μεσημεριανές ώρες ελαχιστοποιούνται σε σχέση με τον Μάρτιο και τον Μάιο, όπου παρατηρήθηκε απόκλιση έως και $3.5 - 4^{\circ}C$. Παρά το γεγονός ότι το WRF φαίνεται να αντιλαμβάνεται τις μεταβολές στις ταχύτητες για τις παραπάνω περιπτώσεις, εντούτοις φαίνεται να τις υποεκτιμά σημαντικά.

Συμπερασματικά η εφαρμογή του πρότυπου αστικού θόλου (UCM) φάνηκε χρήσιμη στις παραπάνω προσομοιώσεις καθώς βελτιώνει σημαντικά τις καμπύλες ταχυτήτων και τις καθιστά συγκριτικά ανώτερες με τις αντίστοιχες που υπολογίζει το TAPM. Η ενσωμάτωση αεροδυναμικών χαρακτηριστικών στις εξισώσεις ορμής και ενέργειας, με την επιβολή όρων όπως η τραχύτητα εδάφους, η ταχύτητα τριβής, όροι θερμικής ακτινοβολίας και πιθανής συναγωγής που επιλύει το μοντέλο, φαίνεται πως επηρεάζουν τους αεροδυναμικούς συντελεστές (CD,CL) και δίνουν μια καλύτερη προσέγγιση των μεταβολών θερμοκρασιών και ταχυτήτων στις τρεις κατευθύνσεις.

Στην χώρα μας επειδή επικρατούν μεγάλα διαστήματα άπνοιας είναι απαραίτητο ο αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας (Temperature/Humidity Sensor) να διαθέτει κλωβό προστασίας. Σε αντίθετη περίπτωση ο αισθητήρας καταγράφει μετρήσεις υψηλότερες από τις πραγματικές λόγω της ευθείας ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται. Αυτός ίσως είναι και ένας από τους λόγους που τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες παρατηρούνται οι αποκλίσεις στα διαγράμματα των θερμοκρασιών και το λογισμικό WRF που χρησιμοποιείται υποεκτιμά τις θερμοκρασίες για την περίπτωση του Setup_3. Ο κλωβός αυτός θα διέθετε ένα μηχανικά αεριζόμενο σύστημα, το οποίο θα εκμεταλλευόταν την ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία, περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο κατά ένα σημαντικό ποσοστό την καταγραφή υψηλότερων, πιθανώς εσφαλμένων θερμοκρασιών τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες.

Κεφάλαιο 7 . Προτάσεις Για Μελλοντικές Εργασίες

7.1.1 Ενεργοποίηση άλλων παραμέτρων (μοντέλα φυσικής, δυναμικής)

Οι προσομοιώσεις που έγιναν στην διάρκεια της διπλωματικής εργασίας αφορούσαν συγκεκριμένα μοντέλα φυσικής και δυναμικής τα οποία αναφέρονται εκτενώς στο 3.2.7 κεφάλαιο. Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η χρήση άλλων μοντέλων φυσικής ή συνδυασμού αυτών για εκ νέου πραγματοποίηση των παραπάνω προσομοιώσεων και εξαγωγή νέων αποτελεσμάτων, ειδικότερα για την περίπτωση της Αθήνας, όπου και διαπιστώνεται πως τα αποτελέσματα αποκλίνουν αρκετά συγκριτικά με τα πειραματικά από τον σταθμό.

Μια καλύτερη προσέγγιση των αποτελεσμάτων θα ήταν επίσης δυνατό να επιτευχθεί, με την ανάπτυξη ενός κώδικα σε NCL γλώσσα προγραμματισμού, για καλύτερη προσέγγιση του γεωγραφικού μήκους και πλάτους ενός κόμβου του πλέγματος. Μέχρι στιγμής η έτοιμη συνάρτηση της NCL `wrf_user_ll_to_ij`, που χρησιμοποιήθηκε, παίρνει ως είσοδο το γεωγραφικό πλάτος/μήκος ενδιαφέροντος και επιστρέφει τους δείκτες του αντίστοιχου κόμβου του πλέγματος κάνοντας παρεμβολή στο κοντινότερο σημείο. Στόχος είναι μια καλύτερη προσέγγιση του εκάστοτε κόμβου του πλέγματος.

7.1.2 Στήσιμο αλυσίδας μοντέλων για πρόγνωση καιρού και ρύπανσης

Στις αλυσίδες μοντέλων, κάθε μοντέλο εκτελεί μια συγκεκριμένη λειτουργία ύστερα από αλληλουχία εντολών και διαδικασιών, όπου τα αποτελέσματα του ενός είναι δεδομένα εισόδου για το επόμενο. Πιο συγκεκριμένα τα αποτελέσματα των WRF προσομοιώσεων θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισόδου σε ενεργειακές εφαρμογές στο δομημένο ή μη περιβάλλον, όπως ανεμολογικά δεδομένα για μελέτες εγκατάστασης αιολικών πάρκων, σε κτιριακές εφαρμογές και στα ηλιακά, ηλιοθερμικά. Ένα μετεωρολογικό μοντέλο πρόγνωσης δίνει επίσης τα δεδομένα του σε ένα μοντέλο διασποράς ή ρύπανσης, το οποίο με την σειρά του τροφοδοτεί ένα επόμενο μοντέλο έκθεσης ή δόσης του ανθρώπινου πληθυσμού.

Μέσα από τα παραπάνω μοντέλα παρέχεται σε μας η δυνατότητα πρόγνωσης της αέριας ρύπανσης και η δυνατότητα εξέτασης εναλλακτικών σεναρίων εκπομπών ρύπων. Δίνεται επίσης η δυνατότητα να εξετάζονται οι υπερβάσεις ορίων ενώ θα είναι πιο εύκολος ο υπολογισμός ρύπανσης σε σημεία όπου δεν είναι πάντα εύκολο να γίνονται μετρήσεις.

Επειδή η ολοκληρωμένη ανάλυση της αέριας ρύπανσης προϋποθέτει και κατάλληλη ενσωμάτωση μετρήσεων, πλέον είναι δυνατή η χρήση μιας μεθόδου αφομοίωσης των δεδομένων ή Data Assimilation, στην οποία συνδυάζονται οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα μοντέλων, με τον βέλτιστο τρόπο. Το WRF συγκεκριμένα παρέχει το WRFDA ένα κατάλληλο πακέτο αφομοίωσης των δεδομένων από διαθέσιμες μετρήσεις. Στόχος είναι η καλύτερη περιγραφή της τρέχουσας κατάστασης, με τον υπολογισμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε μια συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος, δηλαδή ο υπολογισμός της χωρικής κατανομής και χρονικής μεταβολής της συγκέντρωσης των ρύπων στον αέρα.

Βιβλιογραφία

1. Baker, N.L., 1992: Quality control for the U.S. Navy operational database. *Weather Forecast* 7:250–261.
2. Banks R., Tiana-Alsina J., Baldasano J. M., Roca-denbosch F., Papayannis A., Solomos S., Tzanis C. 2015: Sensitivity of boundary-layer variables to PBL schemes in the WRF model based on surface meteorological observations, lidar, and radiosondes during the HygrA-CD campaign.
3. Beljaars, A.C.M., 1994: The parameterization of surface fluxes in large-scale models under free convection, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 121, 255–270.
4. Chen, F., and J. Dudhia, 2001: Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 569–585.
5. Chen, F., M. Tewari, H. Kusaka, and T. T. Warner, 2006: Current status of urban modeling in the community Weather Research and Forecast (WRF) model. Joint with Sixth Symposium on the Urban Environment and AMS Forum: Managing our Physical and Natural Resources: Successes and Challenges, Atlanta, GA, USA, Amer. Meteor. Soc., CD-ROM. J1.4.
6. Courant, R., Friedrichs, K., Lewy, H. September 1956 at [1928]: On the partial difference equations of mathematical physics, AEC Research and Development Report, NYO-7689, New York: AEC Computing and Applied Mathematics Centre – Courant Institute of Mathematical Sciences, pp. V + 76, archived from the original on October 23, 2008.: translated from the German by Phyllis Fox
7. Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, *J. Atmos. Sci.*, 46, 3077–3107.
8. Dyer, A. J., and B. B. Hicks, 1970: Flux-gradient relationships in the constant flux layer, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 96, 715–721.
9. Haltiner G.J. and Williams R.T. “Numerical prediction and dynamic meteorology”, 1980, John Wiley & Sons, Inc.

10. Harshvardhan RD, Randall D, Corsetti T (1987): A fast radiation parameterization for atmospheric circulation models. *J Geophys Res* 92:1009–1016
11. Holton, J.R “An introduction to dynamic meteorology”, 2nd Edition, 1979, Academic Press, Inc.
12. Hong, S.-Y., and H.-L. Pan, 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model, *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2322–2339.
13. Hong, S.-Y., J. Dudhia, and S.-H. Chen, 2004: A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation, *Mon. Wea. Rev.*, 132, 103–120.
14. Hong, S.-Y., and Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2318–2341.
15. Hummel, JR, Reck RA (1979): A global surface albedo model. *J Appl Meteor* 18:239–253
16. Jacobson M.Z. “Fundamentals of atmospheric modeling”, 2000 Cambridge University Press
17. Kalnay E. “Atmospheric modeling, data assimilation and predictability”, 2003, Cambridge University Press
18. Kain, J. S., and J. M. Fritsch, 1990: A one-dimensional entraining/ detraining plume model and its application in convective parameterization, *J. Atmos. Sci.*, 47, 2784–2802.
19. Kain, J. S., and J. M. Fritsch, 1993: Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme, The representation of cumulus convection in numerical models, K. A. Emanuel and D.J. Raymond, Eds., *Amer. Meteor. Soc.*, 246 pp.
20. Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, 43, 170–181.

21. Kiehl, J. T., J. J. Hack, and B. P. Briegleb, 1994: The simulated Earth radiation budget of the National Center for Atmospheric Research community climate model CCM2 and comparisons with the Earth Radiation Budget Experiment (ERBE). *J. Geophys. Res.*, 99, 20,815-20,827.
22. Klemp, J. B., and R. Wilhelmson, 1978: The simulation of three-dimensional convective storm dynamics, *J. Atmos. Sci.*, 35, 1070–1096.
23. Kusaka, H., H. Kondo, Y. Kikegawa, and F. Kimura, 2001: A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models. *Bound.-Layer Meteor.*, 101, 329–358.
24. Kusaka, H. and F. Kimura, 2004: Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82, 67–80.
25. Laprise R., 1992: The Euler Equations of motion with hydrostatic pressure as independent variable, *Mon. Wea. Rev.*, 120, 197–207.
26. Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102 (D14), 16663–16682.
27. Ooyama K. V., 1990: A thermodynamic foundation for modeling the moist atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 47, 2580–2593.
28. Papangelis G., Tombrou M., Dandou A., and Kontos T., 2011: An urban “green planning” approach utilizing the Weather Research and Forecasting (WRF) modeling system. A case study of Athens, Greece.
29. Paulson, C. A., 1970: The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *J. Appl. Meteor.*, 9, 857–861.
30. Pielke R.A, Sr., “Mesoscale meteorological modeling”, 2nd Edition, 2002 Academic Press
31. Reisner, J., R. M. Rasmussen, and R. Bruintjes, 1998: Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 model. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 124, 1071-1107.

32. Skamarock W. C. and J. B. Klemp, 1992: The Stability of Time-Split Numerical Methods for the Hydrostatic and the Nonhydrostatic Elastic Equations, *Mon. Wea. Rev.*: 120, 2109–2127.
33. Smolarkiewicz, P. K., and G. A. Grell, 1990: A class of monotone interpolation schemes, *J. Comp. Phys.*, 101, 431–440.
34. Webb, E. K., 1970: Profile relationships: The log-linear range, and extension to strong stability, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 96, 67–90.
35. Wicker, L. J. and W. C. Skamarock, 2002: Time splitting methods for elastic models using forward time schemes, *Mon. Wea. Rev.*, 130, 2088–2097.
36. Wilson, MF, Henderson-Sellers A (1985): A global archive of land cover and soils data for use in general circulation climate models. *J Climatol* 5:119–143
37. Μπεργελές, Γ. (2006), επανέκδοση 2010: Πηγές, Διασπορά και Έλεγχος Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης, σελ. 77-79, σελ. 137-138

Κέντρα πρόγνωσης που «τρέχουν» αριθμητικά μοντέλα

<http://www.aeronautica.difesa.it/Pagine/default.aspx>

http://www.dwd.de/DE/Home/home_node.html

<http://www.emy.gr/hnms/greek/index.html>

<http://www.meteofrance.com/accueil>

Αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης

<http://arps.ou.edu/>

<http://www.nrlmry.navy.mil/coamps-web/web/home>

<http://www2.mmm.ucar.edu/mm5/>

<http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/RSM/>

<http://www.wrf-model.org/index.php>

Βιβλιογραφικοί σύνδεσμοι

http://www.davisnet.com/product_documents/weather/manuals/07395-027_IM_07859_7860.pdf

http://www.davisnet.com/product_documents/weather/manuals/07395-032_IM_07911.pdf

http://www.davisnet.com/product_documents/weather/manuals/07395-224_IM_7852.pdf

http://www.davisnet.com/product_documents/weather/manuals/07395-112_IM_07817.pdf

<http://www.psicompany.com/man-prod-info/davis/davisman/solarradiationsensor.pdf>

Παράρτημα Α

1) Bash Script **operational.sh** εφαρμογής αυτοματοποιημένης διαδικασίας

```
#!/bin/bash
# Code for running WRF-ARW MODEL
# begin

export PATH=/usr/local/netcdf/bin:${PATH}
export LD_LIBRARY_PATH=/usr/local/netcdf/lib64:${LD_LIBRARY_PATH}
export LD_LIBRARY_PATH=/usr/local/lib64:${LD_LIBRARY_PATH}
#export JASPERLIB=/usr/lib64
#export JASPERINC=/usr/include/jasper
#export WRF_EM_CORE=1
export NCARG_ROOT=/usr/local/ncl
export PATH=/usr/local/ncl/bin:${PATH}
#. /usr/local/apps/vapor-2.2.4/bin/vapor-setup.sh
serial_path=/home/wrfuser/WRF7/serial_mode
cd $serial_path

# Initialisation

duration=48                # 1day=24h, 2days=48h, 3days=72h
((rundays=$duration/24))
active_year=$(date +%Y)
active_month=$(date +%m)
active_day=$(date +%d)
active_hour=$(date +%H)
active_datetime=$(date -d "${active_year}-${active_month}-${active_day} ${active_hour}:00:00")
lag=$(printf "%02g" 6)      # GFS Model Initial Conditions, previous 6 hours available
start_datetime=$(date -d "${active_datetime} -$lag hours")
end_datetime=$(date -d "${start_datetime} ${duration} hours")
start_date=$(date -d "${start_datetime}" "+%Y-%m-%d_%H:%M:%S")
end_date=$(date -d "${end_datetime}" "+%Y-%m-%d_%H:%M:%S")
start_year=$(date -d "$start_datetime" "+%Y")
start_month=$(date -d "$start_datetime" "+%m")
start_day=$(date -d "$start_datetime" "+%d")
start_hour=$(date -d "$start_datetime" "+%H")
end_year=$(date -d "$end_datetime" "+%Y")
end_month=$(date -d "$end_datetime" "+%m")
```

```
end_day=$(date -d "$end_datetime" "+%d")
end_hour=$(date -d "$end_datetime" "+%H")
```

```
cp initialise/namelist.wps .
cp initialise/namelist.input .
cp initialise/asciiwriting_all_in_one.ncl .
cp initialise/asciiwriting_one_file_per_hour.ncl .
cp initialise/firstpoints_diagrams.plt .
cp initialise/fullheight_diagrams.plt .
```

```
sed -i -- "s/year-smonth-sday_shour/${start_year}-${start_month}-${start_day}_${start_hour}"/"
namelist.wps
sed -i -- "s/year-emonth-eday_ehour/${end_year}-${end_month}-${end_day}_${end_hour}"/"
namelist.wps
sed -i -- "s/year/${start_year}"/" namelist.input
sed -i -- "s/month/${start_month}"/" namelist.input
sed -i -- "s/day/${start_day}"/" namelist.input
sed -i -- "s/shour/${start_hour}"/" namelist.input
sed -i -- "s/year/${end_year}"/" namelist.input
sed -i -- "s/emonth/${end_month}"/" namelist.input
sed -i -- "s/eday/${end_day}"/" namelist.input
sed -i -- "s/ehour/${end_hour}"/" namelist.input
sed -i -- "s/rundays/${rundays}"/" namelist.input
sed -i -- "s/year-smonth-sday_shour/${start_year}-${start_month}-${start_day}_${start_hour}"/"
asciiwriting_all_in_one.ncl
sed -i -- "s/year-smonth-sday_shour/${start_year}-${start_month}-${start_day}_${start_hour}"/"
asciiwriting_one_file_per_hour.ncl
sed -i -- "s/year/${start_year}"/" firstpoints_diagrams.plt
sed -i -- "s/month/${start_month}"/" firstpoints_diagrams.plt
sed -i -- "s/day/${start_day}"/" firstpoints_diagrams.plt
sed -i -- "s/shour/${start_hour}"/" firstpoints_diagrams.plt
sed -i -- "s/year/${start_year}"/" fullheight_diagrams.plt
sed -i -- "s/month/${start_month}"/" fullheight_diagrams.plt
sed -i -- "s/day/${start_day}"/" fullheight_diagrams.plt
sed -i -- "s/shour/${start_hour}"/" fullheight_diagrams.plt
sed -i -- "s/year/${end_year}"/" firstpoints_diagrams.plt
sed -i -- "s/emonth/${end_month}"/" firstpoints_diagrams.plt
sed -i -- "s/eday/${end_day}"/" firstpoints_diagrams.plt
sed -i -- "s/ehour/${end_hour}"/" firstpoints_diagrams.plt
sed -i -- "s/year/${end_year}"/" fullheight_diagrams.plt
```

```
sed -i -- "s/emonth/${end_month}/" fullheight_diagrams.plt
sed -i -- "s/eday/${end_day}/" fullheight_diagrams.plt
sed -i -- "s/ehour/${end_hour}/" fullheight_diagrams.plt
```

```
#Downloading the necessary GFS files
```

```
date=$(printf "%04g%02g%02g" $start_year $start_month $start_day)
wget -c
http://www.ftp.ncep.noaa.gov/data/nccf/com/gfs/prod/gfs.${date}${start_hour}/gfs.t${start_hour}z.pgrb2.0p50.anl -P .

for counter in $(seq -f "%03g" 0 3 $duration)
do
    wget -c
    http://www.ftp.ncep.noaa.gov/data/nccf/com/gfs/prod/gfs.${date}${start_hour}/gfs.t${start_hour}z.pgrb2.0p50.f${counter} -P .
done
```

```
# Geogrid section
```

```
ln -sf ../WPS/geogrid .
ln -sf ../WPS/geogrid/src/geogrid.exe .
./geogrid.exe > log.geog
```

```
# Ungrib section
```

```
ln -sf ../WPS/ungrib .
ln -sf ../WPS/ungrib/src/ungrib.exe .
ln -sf ../WPS/ungrib/Variable_Tables/Vtable.GFS Vtable
ln -sf ../WPS/util .
ln -sf ../WPS/link_grib.csh .
ncl util/plotgrids2.ncl
./link_grib.csh gfs* .
./ungrib.exe > log.ungrib
```

```

# Metgrid section

ln -sf ../WPS/metgrid .
ln -sf ../WPS/metgrid/src/metgrid.exe .
./metgrid.exe > log.met

# Removing prerun files

rm GRIBFILE*
rm gfs*
rm GFSG2*

# Model run section

ln -sf ../WRFV3/main/real.exe .
./real.exe > log.real
ln -sf ../WRFV3/main/wrf.exe .
ln -sf ../WRFV3/test/em_real/*.TBL .
ln -sf ../WRFV3/test/em_real/*_DATA .

#####    Run in Parallel Mode    #####

export OMP_DYNAMIC=TRUE  # TRUE or FALSE whether Parallel mode has to be activated
export OMP_NUM_THREADS=10  # how many threads run the simulation N=10 , N=20
./wrf.exe > log.wrf

# Creating ascii files via ncl scripts

./script_allinone.sh > log.allinone
./script_onefileperhour.sh > log.onefileperhour

# Removing postrun wrfrestart and met_em files

rm wrfst*
rm met_em*

# Creating pdf output files via gnuplot scripts for internet upload

gnuplot firstpoints_diagrams.plt
gnuplot fullheight_diagrams.plt

```

```
# Removing postrun wrfout files, keeping the 4th domain only
```

```
rm wrfout_d01*  
rm wrfout_d02*  
rm wrfout_d03*  
mv *.txt txts/.  
mv *.gif forecasts/.
```

```
#end
```


2) Αρχείο Εισόδου **namelist.wps**

```
&share
wrf_core           = 'ARW',
max_dom            = 4,
start_date         = 'syear-smonth-sday_shour:00:00',
                  'syear-smonth-sday_shour:00:00',
                  'syear-smonth-sday_shour:00:00',
                  'syear-smonth-sday_shour:00:00',
end_date           = 'eyear-emonth-eday_ehour:00:00',
                  'syear-smonth-sday_shour:00:00',
                  'syear-smonth-sday_shour:00:00',
                  'syear-smonth-sday_shour:00:00',
interval_seconds   = 10800
io_form_geogrid    = 2,
/
&geogrid
parent_id          = 0,    1,    2,    3,
parent_grid_ratio  = 1,    2,    4,    3,
i_parent_start     = 1,    31,   11,   11,
j_parent_start     = 1,    31,   11,   11,
e_we               = 75,   31,   33,   31,
e_sn               = 75,   31,   33,   31,
geog_data_res      = '30sec', '30sec', '30sec', '30sec',
dx                 = 12000,
dy                 = 12000,
map_proj           = 'lambert',
ref_lat            = 37.9745219,
ref_lon            = 23.768284,
truelat1           = 60.0
truelat2           = 30.0
stand_lon          = 23.768284,
geog_data_path     = '/home/wrfuser/WRF7/WPS/geog'
/
&ungrib
out_format         = 'WPS',
prefix             = 'GFSG2',
/
&metgrid
fg_name            = 'GFSG2'
io_form_metgrid    = 2,
/
```

3) Αρχείο Εισόδου **namelist.input**

```
&time_control
run_days           = runday,
run_hours          = 0,
run_minutes        = 0,
run_seconds        = 0,
start_year         = syear,
                   syear,
                   syear,
                   syear,
start_month        = smonth,
                   smonth,
                   smonth,
                   smonth,
start_day          = sday,
                   sday,
                   sday,
                   sday,
start_hour         = shour,
                   shour,
                   shour,
                   shour,
start_minute       = 00, 00, 00, 00,
start_second       = 00, 00, 00, 00,
end_year           = eyear,
                   eyear,
                   eyear,
                   eyear,
end_month          = emonth,
                   emonth,
                   emonth,
                   emonth,
end_day            = eday,
                   eday,
                   eday,
                   eday,
end_hour           = ehour,
                   ehour,
                   ehour,
                   ehour,
end_minute         = 00, 00, 00, 00,
end_second         = 00, 00, 00, 00,
interval_seconds   = 10800
input_from_file    = .true.,.true.,.true.,.true.,
history_interval   = 60, 60, 60, 60,
frames_per_outfile = 1000, 1000, 1000, 1000,
restart            = .false.,
restart_interval   = 720,
io_form_history    = 2
io_form_restart    = 2
```

```

io_form_input           = 2
io_form_boundary        = 2
debug_level            = 0
/
&domains
time_step              = 30,
time_step_fract_num    = 0,
time_step_fract_den    = 1,
max_dom                = 4,
s_we                   = 1, 1, 1, 1,
e_we                   = 75, 31, 33, 31,
s_sn                   = 1, 1, 1, 1,
e_sn                   = 75, 31, 33, 31,
s_vert                 = 1, 1, 1, 1,
e_vert                 = 45, 45, 45, 45,
p_top_requested        = 5000,
num_metgrid_levels     = 32,
num_metgrid_soil_levels = 4,
dx                     = 12000, 6000, 1500, 500,
dy                     = 12000, 6000, 1500, 500,
grid_id                = 1, 2, 3, 4,
parent_id              = 0, 1, 2, 3,
i_parent_start         = 1, 31, 11, 11,
j_parent_start         = 1, 31, 11, 11,
parent_grid_ratio      = 1, 2, 4, 3,
parent_time_step_ratio = 1, 2, 4, 3,
feedback               = 1,
smooth_option          = 2,
target_cfl             = 1.2, 1.2, 1.2, 1.2,
/
&physics
mp_physics             = 3, 3, 3, 3,
ra_lw_physics          = 1, 1, 1, 1,
ra_sw_physics          = 1, 1, 1, 1,
radt                   = 30, 30, 30, 30,
sf_sfclay_physics     = 1, 1, 1, 1,
sf_surface_physics     = 2, 2, 2, 2,
bl_pbl_physics         = 1, 1, 1, 1,
bldt                   = 0, 0, 0, 0,
cu_physics             = 1, 1, 0, 0,
cudt                   = 5, 5, 5, 5,
isfflx                 = 1,
ifsnow                 = 1,
icloud                 = 1,
surface_input_source   = 1,
num_soil_layers        = 4,
sf_urban_physics       = 1, 1, 1, 1,
/
&fdda
/
&dynamics
w_damping              = 0,

```

```

diff_opt           = 1,      1,      1,      1,
km_opt            = 4,      4,      4,      4,
diff_6th_opt      = 0,      0,      0,      0,
diff_6th_factor   = 0.12,   0.12,   0.12,   0.12,
base_temp         = 290.
damp_opt          = 0,
zdamp             = 5000.,   5000.,   5000.,   5000.,
dampcoef          = 0.2,     0.2,     0.2,     0.2,
khdif             = 0,      0,      0,      0,
kvdif             = 0,      0,      0,      0,
epssm             = 0.5,     0.5,     0.5,     0.5,
non_hydrostatic   = .true.,   .true.,   .true.,   .true.,
moist_adv_opt     = 1,      1,      1,      1,
scalar_adv_opt    = 1,      1,      1,      1,
/
&bdy_control
spec_bdy_width    = 5,
spec_zone         = 1,
relax_zone        = 4,
specified         = .true.,   .false., .false.,
.false.,
nested            = .false.,   .true.,   .true.,
.true.,
/
&grib2
/
&namelist_quilt
nio_tasks_per_group = 0,
nio_groups = 1,
/

```

4) Αρχείο αποτελεσμάτων σε ASCII μορφή (.txt) **asciwriting_all_in_one.ncl**

```
; Code for writing ascii files from a WRF-ARW output

; loading the necessary functions and libraries

;*****
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/gsn_code.ncl"
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/gsn_csm.ncl"
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/wrf/WRFUserARW.ncl"
;*****

begin
;*****

a = addfile("./wrfout_d0_syear-smonth-sday_shour:00:00.nc","r")

Ua = wrf_user_getvar(a,"ua",-1)           ; get Ua for all times
Uten = wrf_user_getvar(a,"U10",-1)       ; get U10 for all times
Va = wrf_user_getvar(a,"va",-1)         ; get Va for all times
Wa = wrf_user_getvar(a,"wa",-1)         ; get Wa for all times
PH = wrf_user_getvar(a,"PH",-1)         ; get PH for all times
PHB= wrf_user_getvar(a,"PHB",-1)        ; get PHB for all times
terrain = wrf_user_getvar(a,"HGT",-1)    ; get height for all times
tc = wrf_user_getvar(a,"tc",-1)         ; get temperature in
Celsius for all times

times = wrf_user_list_times (a)          ; getting all times
dims = dimsizes (times)

; find the nearest i,j 0 from lat,lon

lat = 37.97453      ; lat Kozanis=40.3002635 , lat Athinas=37.97453
lon = 23.76828     ; lon Kozanis=21.800083 , lon Athinas=23.76828

res = False                ; ij 0 is an integer
xy_location = wrf_user_ll_to_ij (a,lon,lat,res)
ki = xy_location (0)
kj = xy_location (1)
print("the ilocation is " + " "+ ki)
print("the jlocation is " + " "+ kj)

; find the nearest lat lon from i,j location

res = True                  ; lat,lon 0 is real
latlon = wrf_user_ij_to_ll (a,ki,kj,res)
llon = latlon(0)
lilat = latlon(1)
el= lilat-lat
print ("to el = " + el)
print("the requested longitude is " + " "+ llon) ; print lon from i,j
```

```

print("the requested latitude is " + " " + llat) ; print lat from i,j

startdate = times(0) ; 0=nospinup, 24=1dayspinup, 48=2daysspinup
spl1 = str_split_csv(startdate, "_", 0)
filedate1 = spl1(0,0)
strdate2 = spl1(0,1)
spl2 = str_split_csv(strdate2, ":", 0)
filedate2 = spl2(0,0)
print (filedate2)

; writing ascii file section

filename = (filedate1 + "_" + filedate2 +
"_resultsd0_whichpoint.txt")
file_start = (" /This is the beginning of the file/")
data1 = [/file_start/]
write_table(filename,"w",data1,"%s")

; iterative process

shmeio = ipsos
eta = shmeio

vdate = ("date")
vtime = ("time")
vu = ("Ua(m/s)")
vv = ("Va(m/s)")
vw = ("Wa(m/s)")
vwi = ("Windspeed(m/s)")
vh = ("Theta_Height(m)")
vt = ("Temperature(oC)")
variables = [/vtime, vh, vt, vu, vv, vwi, vw/]
write_table(filename,"a",variables,"%s, %s, %s, %s, %s, %s, %s")

do t=0,dims-1 ; 0=nospinup, 24=1dayspinup, 48=2daysspinup
j=eta
elevation_W = (PH(t,j,kj,ki)+PHB(t,j,kj,ki))/9.81
print (elevation_W)
elevation_theta =
0.5*(PH(t,j,kj,ki)+PHB(t,j,kj,ki)+PH(t,j+1,kj,ki)+PHB(t,j+1,kj,ki))/9.
81
print (elevation_theta)
temperature = tc(t,j,kj,ki)
Uspeed = Ua(t,j,kj,ki)
Vspeed = Va(t,j,kj,ki)
Wspeed = Wa(t,j,kj,ki)
Windvelocity = sqrt(Uspeed^2+Vspeed^2)

ti = times(t)
strs = str_split_csv(ti, "_", 0)
ddate = strs(0,0)

```

```

ttime = str(0,1)
us = Uspeed
vs = Vspeed
ws = Wspeed
wi = Windvelocity
mth = elevation_theta
mw = elevation_W
hfg = mth - terrain(0,kj,ki)          ; hfg = height from ground
te = temperature

values = [/ti, hfg, te, us, vs, wi, ws/]
write_table(filename,"a",values,"%12s, %12f, %12f, %12f, %12f, %12f,
%12f")

end do

end_of_file = (" /This is the end of file/")
data4 = [/end_of_file/]
write_table(filename,"a",data4,"%s")

end

```

5) Αρχείο GNUPLOT **firstpoints.plt** δημιουργίας διαγραμμάτων σε μορφή .pdf

```
# 1st point

set terminal pdf
set output "sday_smonth_shour_first_point_temperature.pdf"
set title "z=25m temperature"
set xdata time
set timefmt x "%Y-%m-%d_%H:%M:%S,"
set xrange ["syear-smonth-sday_shour:00:00":"eyear-emonth-
eday_ehour:00:00"]
set format x "%d/%m\n%H:%S"
set xlabel "Time UTC"

set autoscale y
set ylabel "temperature(^oC)"
set format y "%2.1f"

set key reverse Left outside
set grid

plot "syear-smonth-sday_shour_resultsd01_firstpoint.txt" using 1:3
title "d01" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'blue',\
      "syear-smonth-sday_shour_resultsd02_firstpoint.txt" using 1:3
title "d02" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'red',\
      "syear-smonth-sday_shour_resultsd03_firstpoint.txt" using 1:3
title "d03" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'green',\
      "syear-smonth-sday_shour_resultsd04_firstpoint.txt" using 1:3
title "d04" w l ls 17 lw 4 lc rgb 'yellow',\
      "syear-smonth-sday_shour_firstpoint_test.txt" using 1:3 title
"Davis" w p pt 9 lc rgb 'black'

set terminal pdf
set output "sday_smonth_shour_first_point_windspeed.pdf"
set title "z=25m windspeed"
set xdata time
set timefmt x "%Y-%m-%d_%H:%M:%S,"
set xrange ["syear-smonth-sday_shour:00:00":"eyear-emonth-
eday_ehour:00:00"]
set format x "%d/%m\n%H:%S"
set xlabel "Time UTC"

set autoscale y
set ylabel "windspeed(m/s)"
```



```

set format y "%4.0f"

set key reverse Left outside
set grid

plot "syear-smonth-sday_shour_resultsd01_firstpoint.txt" using 1:6
title "d01" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'blue',\
    "syear-smonth-sday_shour_resultsd02_firstpoint.txt" using 1:6
title "d02" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'red',\
    "syear-smonth-sday_shour_resultsd03_firstpoint.txt" using 1:6
title "d03" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'green',\
    "syear-smonth-sday_shour_resultsd04_firstpoint.txt" using 1:6
title "d04" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'yellow',\
    "syear-smonth-sday_shour_firstpoint_test.txt" using 1:5 title
"Davis" w p pt 9 lc rgb 'black'

# 2nd point

set terminal pdf
set output "sday-smonth-shour_second_point_temperature.pdf"
set title "z=50m temperature"
set xdata time
set timefmt x "%Y-%m-%d_%H:%M:%S,"
set xrange ["syear-smonth-sday_shour:00:00":"eyear-emonth-
eday_ehour:00:00"]
set format x "%d/%m\n%H:%S"
set xlabel "Time UTC"

set autoscale y
set ylabel "temperature(^oC)"
set format y "%2.1f"

set key reverse Left outside
set grid

plot "syear-smonth-sday_shour_resultsd01_secondpoint.txt" using 1:3
title "d01" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'blue',\
    "syear-smonth-sday_shour_resultsd02_secondpoint.txt" using 1:3
title "d02" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'red',\
    "syear-smonth-sday_shour_resultsd03_secondpoint.txt" using 1:3
title "d03" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'green',\
    "syear-smonth-sday_shour_resultsd04_secondpoint.txt" using 1:3
title "d04" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'yellow',\
    "syear-smonth-sday_shour_secondpoint_test.txt" using 1:3 title
"Davis" w p pt 9 lc rgb 'black'

```

```

set terminal pdf
set output "sday_smonth_shour_second_point_windspeed.pdf"
set title "z=50m windspeed"
set xdata time
set timefmt x "%Y-%m-%d_%H:%M:%S,"
set xrange ["syear-smonth-sday_shour:00:00":"eyear-emonth-
eday_ehour:00:00"]
set format x "%d/%m\n%H:%S"
set xlabel "Time UTC"

set autoscale y
set ylabel "windspeed(m/s)"
set format y "%4.0f"

set key reverse Left outside
set grid

plot "syear-smonth-sday_shour_resultsd01_secondpoint.txt" using 1:6
title "d01" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'blue',\
      "syear-smonth-sday_shour_resultsd02_secondpoint.txt" using 1:6
title "d02" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'red',\
      "syear-smonth-sday_shour_resultsd03_secondpoint.txt" using 1:6
title "d03" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'green',\
      "syear-smonth-sday_shour_resultsd04_secondpoint.txt" using 1:6
title "d04" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'yellow',\
      "syear-smonth-sday_shour_secondpoint_test.txt" using 1:5 title
"Davis" w p pt 9 lc rgb 'black'

# 3rd point

set terminal pdf
set output "sday_smonth_shour_third_point_temperature.pdf"
set title "z=132m temperature"
set xdata time
set timefmt x "%Y-%m-%d_%H:%M:%S,"
set xrange ["syear-smonth-sday_shour:00:00":"eyear-emonth-
eday_ehour:00:00"]
set format x "%d/%m\n%H:%S"
set xlabel "Time UTC"

set autoscale y
set ylabel "temperature(^oC)"
set format y "%2.1f"

```

```

set key reverse Left outside
set grid

plot "syear-smonth-sday_shour_resultsd01_thirdpoint.txt" using 1:3
title "d01" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'blue',\
      "syear-smonth-sday_shour_resultsd02_thirdpoint.txt" using 1:3
title "d02" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'red',\
      "syear-smonth-sday_shour_resultsd03_thirdpoint.txt" using 1:3
title "d03" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'green',\
      "syear-smonth-sday_shour_resultsd04_thirdpoint.txt" using 1:3
title "d04" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'yellow',\
      "syear-smonth-sday_shour_thirdpoint_test.txt" using 1:3 title
"Davis" w p pt 9 lc rgb 'black'

```

```

set terminal pdf
set output "sday-smonth_shour_third_point_windspeed.pdf"
set title "z=132m windspeed"
set xdata time
set timefmt x "%Y-%m-%d_%H:%M:%S,"
set xrange ["syear-smonth-sday_shour:00:00":"eyear-emonth-
eday_ehour:00:00"]
set format x "%d/%m\n%H:%S"
set xlabel "Time UTC"

```

```

set autoscale y
set ylabel "windspeed(m/s)"
set format y "%4.0f"

```

```

set key reverse Left outside
set grid

```

```

plot "syear-smonth-sday_shour_resultsd01_thirdpoint.txt" using 1:6
title "d01" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'blue',\
      "syear-smonth-sday_shour_resultsd02_thirdpoint.txt" using 1:6
title "d02" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'red',\
      "syear-smonth-sday_shour_resultsd03_thirdpoint.txt" using 1:6
title "d03" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'green',\
      "syear-smonth-sday_shour_resultsd04_thirdpoint.txt" using 1:6
title "d04" w l ls 1 lw 4 lc rgb 'yellow',\
      "syear-smonth-sday_shour_thirdpoint_test.txt" using 1:5 title
"Davis" w p pt 9 lc rgb 'black'

```