



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΚΑΙΡΟΥ ΤΟΥ ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΠΕΡΙΟΔΟ 2010-2012»**

**ΜΥΛΩΝΑ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ
Α.Μ: 20645**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΚΑΤΣΑΦΑΔΟΣ ΠΕΤΡΟΣ**

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2013

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	2
Abstract	3
Κεφάλαιο 1^ο – Εισαγωγή	4
Κεφάλαιο 2^ο – Περιγραφή του μοντέλου WRF-NMM	11
2.1 Βασικές αρχές του μοντέλου	11
2.2 Κατακόρυφη συντεταγμένη και εξισώσεις	13
2.3 Οριζόντιο πλέγμα	15
2.4 Διακριτοποίηση	17
2.5 Σχήματα φυσικής	19
Κεφάλαιο 3^ο – Διαμόρφωση του μοντέλου και μεθοδολογία αξιολόγησης	25
3.1 Εισαγωγή	25
3.2 Διαμόρφωση του μοντέλου και προγνωστικά προϊόντα	25
3.3 Μεθοδολογία	31
Κεφάλαιο 4^ο – Αποτελέσματα	38
4.1 Ατμοσφαιρική πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας	38
4.2 Θερμοκρασία του ανέμου στα 2 m	52
4.3 Ένταση του ανέμου στα 10 m	64
4.4 Βροχόπτωση	76
Κεφάλαιο 5^ο – Συμπεράσματα	84
Βιβλιογραφία	86

Περίληψη

Για την πρόγνωση του καιρού χρησιμοποιούνται τα αριθμητικά μοντέλα των οποίων η ολοκλήρωσή γίνεται είτε υδροστατικά είτε μη υδροστατικά. Τα συγκεκριμένα μοντέλα έχουν φτάσει σε τέτοιες οριζόντιες αναλύσεις, επιτρέποντας την αναπαράσταση διεργασιών, όπου η υδροστατική προσέγγιση σταματάει να είναι έγκυρη. Τα συστήματα πρόγνωσης που έχουν αναπτυχθεί, βασίζονται στην περιγραφή των φυσικών διεργασιών με βάση τους νόμους διατήρησης της ορμής, της μάζας και της ενέργειας. Ένα τέτοιο μοντέλο είναι και το Weather Research Forecasting Non-hydrostatic Mesoscale Model (WRF-NMM), το οποίο χρησιμοποιείται είτε για επιχειρησιακή πρόγνωση, είτε για ανάγκες ατμοσφαιρικών ερευνών. Στο Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο το WRF-NMM εκτελείται επιχειρησιακά και έχει εγκατασταθεί και προσαρμοστεί κατάλληλα στην παράλληλη υπολογιστική υποδομή του τμήματος. Μετά από 4έτη συνεχούς επιχειρησιακής λειτουργίας σε καθημερινή βάση έχει δημιουργηθεί σημαντική βάση μετεωρολογικών πλεγματικών δεδομένων που υπερβαίνει τα 6TB αυξάνοντας την ανάγκη αξιολόγησης του μοντέλου. Στη συγκεκριμένη εργασία, οι προγνώσεις από το μοντέλο WRF συγκρίνονται με παρατηρήσεις από περίπου 900 μετεωρολογικούς σταθμούς σε ολόκληρο το πεδίο ολοκλήρωσης. Η πίεση στη μέση στάθμη θάλασσας, η θερμοκρασία στα 2 m, η ένταση του ανέμου στα 10 m και ο αθροιστικός υετός δωρου αξιολογούνται για να μπορέσει να γίνει η αξιολόγηση των στατιστικών δεικτών bias και RMSE και η διερεύνηση της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε λογισμικό αποκωδικοποίησης δεδομένων grib, εξελιγμένα σχήματα ελέγχου της ποιότητας των παρατηρήσεων και υπολογισμό αποδεκτών στατιστικών μεγεθών όπως το συστηματικό σφάλμα (bias) και η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) τόσο για συνεχείς όσο και για διακριτές μεταβλητές. Σύμφωνα με τους παραπάνω δείκτες το μοντέλο παρουσιάζει ικανοποιητική προγνωστική συμπεριφορά για όλα τα προγνωστικά πεδία που αξιολογήθηκαν στο σύνολο της περιόδου αξιολόγησης, από τον Ιανουάριο του 2010 έως το Δεκέμβριο του 2012 και αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο εκτίμησης του καιρού για τον ελλαδικό χώρο και την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου.

Abstract

Numerical weather prediction models have been widely used in order to predict the weather accurately. They are usually divided to either hydrostatic or non-hydrostatic ones. These models have reached such horizontal resolutions that allow a reliable representation of data especially when the hydrostatic approach ceases to be valid. The systems of weather forecasting that have been developed are based on the description of the physical processes that have to do with the relation between the conservation of momentum, mass and energy. Such a model is the Weather Research Forecasting Non-hydrostatic Mesoscale Model (WRF-NMM) which, in fact, is used either for operational weather prediction or for research purposes. At Harokopio University the WRF-NMM runs on an operational basis and has been installed and configured appropriately in the parallel computing infrastructure of the department. After four years of continuous operational mode on a daily basis a valuable database consisting of meteorological input has been created that actually exceeds 6TB thus, maximizing the need for model evaluation. . In this present study, forecasts based on the particular model (WRF) are compared to records from 900 weather stations in the entire domain of integration. The average sea level pressure, the temperature at 2 m, the wind speed at 10 m and the 6-hour cumulative precipitation are evaluated in order to assess the above mentioned statistical scores and to investigate the forecasting accuracy of the model. For these purposes, a grib decoding software has been developed as well as advanced models that control the quality of the observed values together with the estimation of acceptable statistical scores such as the mean wind speed (bias) and the root means square (RMSE) errors applied to both the continuous and discrete variables. According to the aforementioned indicators the particular model shows a satisfying forecasting behavior that spanned from January 2012 to December 2012 and therefore, constitutes a reliable tool for assessing the weather both in Greece and the broader Mediterranean Basin.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Εισαγωγή

Η ατμόσφαιρα αποτελεί σημαντικό στοιχείο του φυσικού περιβάλλοντος για τον άνθρωπο αφού μέσα σ' αυτό ζει, κινείται και αναπτύσσεται. Για το λόγο αυτό και οι επιστήμονες από πολύ νωρίς ενδιαφέρθηκαν για την κατανόηση των φυσικών φαινομένων και την πρόγνωση του καιρού. Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα υπάρχει μεγάλη ανάπτυξη της μελέτης των σπουδαιότερων μετεωρολογικών στοιχείων, όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η υγρασία και ο άνεμος, με την χρήση του αερόστατου, του αεροπλάνου και της ραδιοβόλισης. Με το πέρασμα των χρόνων οι μέθοδοι πρόγνωσης καιρού εξελίχθηκαν και την θέση τους πήραν οι τεχνητοί δορυφόροι και πύραυλοι και ιδιαίτερα οι μετεωρολογικοί δορυφόροι. Σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της πρόγνωσης καιρού έπαιξε και η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών συστημάτων, όπως τα radar, με αποκορύφωμα την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών όπου χάρη σε αυτούς πραγματοποιήθηκε η αριθμητική πρόγνωση καιρού (Κατσαφάδος, 2007).

Τα τελευταία χρόνια για την πρόγνωση του καιρού τα αριθμητικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται είναι τα υδροστατικά και τα μη υδροστατικά (Hashimoto, et al. 2008). Τα μοντέλα πρόγνωσης καιρού έχουν φτάσει σε τέτοιες οριζόντιες αναλύσεις, επιτρέποντας την αναπαράσταση των δεδομένων, όπου η υδροστατική προσέγγιση σταματάει να είναι έγκυρη. Για το λόγο αυτό, αποτελεί προτεραιότητα πολλών μετεωρολογικών υπηρεσιών και ιδρυμάτων η διαμόρφωση και εφαρμογή των μη υδροστατικών μοντέλων αριθμητικής πρόγνωσης καιρού (Numerical Weather Prediction - NWP). Έχοντας μεγάλη εμπειρία στα υδροστατικά NWP μοντέλα καθώς και στην αξιοπιστία και ακρίβεια τους, η μη υδροστατική προσέγγιση έχει διατηρήσει τα βασικά πλεονεκτήματα της υδροστατικής προσέγγισης και χρησιμοποιεί την βασιζόμενη στην πίεση σ κατακόρυφη συντεταγμένη (Janjic et al., 2001). Για να είναι επιτυχές ένα μη υδροστατικό μοντέλο οφείλει να έχει τουλάχιστον παρόμοια ακρίβεια (στην ίδια ανάλυση) με τα υδροστατικά και την ικανότητα να αναπαράγει σωστά μη υδροστατικές ροές σε πολύ υψηλές αναλύσεις.

Τέλος θα πρέπει να μην αυξάνει υπέρμετρα την υπολογιστική ισχύ (Janjic et al., 2005). Με βάση τα παραπάνω, σε χαμηλές αναλύσεις ουσιαστική διαφορά δεν υπάρχει, αντίθετα σε υψηλές αναλύσεις τα μη υδροστατικά δίνουν καλύτερα αποτελέσματα. Αναφορικά με την υπολογιστική ισχύ τα μη υδροστατικά μοντέλα απαιτούν 20% επιπλέον.

Ο καλύτερος τρόπος για να μπορέσει να φανεί η αξιοπιστία και η ακρίβεια ενός αριθμητικού μοντέλου πρόγνωσης καιρού, είτε είναι υδροστατικό είτε μη υδροστατικό, είναι οι αξιολογήσεις των προγνώσεων. Η αξιολόγηση της πρόγνωσης είναι η διαδικασία του προσδιορισμού της ποιότητας των προβλέψεων. Υπάρχει ποικιλία διαδικασιών επαλήθευσης της πρόγνωσης, αλλά όλες αφορούν την σχέση μεταξύ της πρόβλεψης ή του συνόλου των προβλέψεων και της αντίστοιχης παρατήρησης. Οποιαδήποτε μέθοδος αξιολόγησης των παρατηρήσεων περιλαμβάνει αναγκαστικά συγκρίσεις μεταξύ των ζευγαριών των προβλέψεων και των παρατηρήσεων (Daniel, 1995). Στην συνέχεια γίνεται αναφορά σε αξιολογήσεις που έχουν γίνει για κάποια από τα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού.

Παλιότερες μελέτες έχουν εξετάσει τις επιπτώσεις της οριζόντιας ανάλυσης, σχετικά με την αξιοπιστία και την ακρίβεια των προβλέψεων. Οι περισσότερες έχουν δείξει πως μειώνοντας τις αποστάσεις του πλέγματος κάτω από τα 10 km τα αποτελέσματα είναι πιο ρεαλιστικά (Mass et al. 2002). Αυτό φαίνεται από την αξιολόγηση των Nachamkin and Hodur 2000, οι οποίοι έτρεξαν το μοντέλο COAMPS, από τις 30 Σεπτεμβρίου 1998 έως τις 31 Δεκεμβρίου 1999 πάνω από την περιοχή της λεκάνης της Μεσογείου, το μοντέλο έτρεχε δυο φορές τη ημέρα. Διαπίστωσαν ότι μειώνοντας την απόσταση του πλέγματος από 81 σε 12 km η επίπτωση στην τετραγωνική ρίζα του μέσου σφάλματος (RMSE), για την θερμοκρασία και την υγρασία ήταν μικρή. Από την άλλη όμως παρατήρησαν σχετικές βελτιώσεις στο συστηματικό σφάλμα (Bias) στην κατώτερη τροπόσφαιρα. Για την ένταση του ανέμου τα σφάλματα ήταν σχεδόν ανεπηρέαστα από την αύξηση της ανάλυσης (Nachamkin and Hodur, 2000).

Την ίδια χρονιά οι Colle et al., αξιολόγησαν το μοντέλο Mesoscale Model 5 (MM5), για τις δροσερές περιόδους από τις 10 Νοεμβρίου 1997 έως 16 Μαρτίου 1998 και από την 1 Οκτωβρίου 1998 έως και τις 8 Μαρτίου 1999,

πάνω από τον βορειοδυτικό Ειρηνικό. Η οριζόντια ανάλυση έγινε από τα 36km στα 12km και από τα 12km στα 4km, με την συνεργασία παρατηρήσεων από 250 σταθμούς του NOAA, τηλεμετρία χιονιού (SNOTEL) και του National Weather Service. Βελτιώσεις παρατηρήθηκαν στους δείκτες bias, rmse και βαθμό ισοδύναμης προειδοποίησης κατά την αύξηση της ανάλυσης από 36km σε 12km. Αντίθετα από 12 km σε 4km η ικανότητα του μοντέλου περιορίστηκε για έντονες κατακρημνίσεις, ενώ για μεσαίες καταστάσεις υπήρξαν υπερεκτιμήσεις κατά μήκος των προσάνεμων πλαγιών. Γενικά παρατηρήθηκαν προβλήματα κατά την αύξηση της ανάλυσης στα 4km, δημιουργώντας την ανάγκη για βελτίωση του MM5 (Colle et al., 2000).

Συνέχεια της παραπάνω εργασίας αλλά και για την βελτίωση του MM5, τον Σεπτέμβριο του 1999 οι Colle et al 2001, σύγκριναν το MM5 με το Eta. Τέθηκε σε λειτουργία το μοντέλο MM5, το οποίο χρησιμοποιούσε τις αρχικές και οριακές συνθήκες του Eta, με σκοπό να υπάρξει μια ολοκληρωμένη και μακροχρόνια αξιολόγηση και σύγκριση των μοντέλων αυτών, πάνω από την περιοχή των ανατολικών ΗΠΑ κατά την διάρκεια των δροσερών και θερμών περιόδων. Η διαφορά των δυο μοντέλων φάνηκε τον Σεπτέμβριο του 1999, όπου το MM5 προσομοίωσε ρεαλιστικά την θύελλα Floyd, ενώ το Eta προσέγγισε μια πολύ πιο ασθενή θύελλα. Στη φάση αυτή το MM5 βρέθηκε να υπερτερεί του Eta, ωστόσο κατά την διάρκεια της δροσερής περιόδου το MM5 με ανάλυση στα 12km υπερεκτίμησε τα κατακρημνίσματα πάνω από τις προσάνεμες πλαγιές, ενώ τα υποεκτίμησε στα απάνεμα μέρη. Παρ' όλα αυτά το MM5 είχε καλύτερα αποτελέσματα σε αναλύσεις των 4km σε αστικές περιοχές και στις ακτογραμμές (Colle et al., 2001).

Ακολουθώντας την μέθοδο της σύγκρισης αυτή την φορά μεταξύ των μοντέλων CIRP WRF και Eta, οι Cheng και Steenburgh 2005, αξιολόγησαν τις προβλέψεις των δυο μοντέλων κατά την θερμή περίοδο Ιουνίου – Αυγούστου του 2003 πάνω από τις δυτικές ΗΠΑ. Για την αξιολόγηση εξετάστηκαν και συγκρίθηκαν τρία προγνωστικά μεγέθη η θερμοκρασία στα 2m, η ταχύτητα του ανέμου στα 10m και το σημείο δρόσου στα 2m, παίρνοντας παρατηρήσεις ανά τρεις ώρες και για τα δυο μοντέλα. Σε όλο των κύκλο των προβλέψεων το CIRP WRF έδωσε έγκυρες τιμές θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της ημέρας, έπειτα είχε μια τάση να παράγει μεγαλύτερες

θερμοκρασίες. Επίσης την ίδια πορεία ακολουθούσαν και οι παρατηρήσεις για το σημείο δρόσου, που αυτό σημαίνει ότι το CIRP WRF παρήγαγε μεγαλύτερο bias από το Eta. Τέλος όσο αναφορά την ταχύτητα του ανέμου υπήρχαν συγκρίσιμα ζεύγη παρατηρήσεων και προβλέψεων μεταξύ και των δυο μοντέλων. Το CIRP WRF υπερεκτιμούσε την ταχύτητα του ανέμου στα 10m, ενώ το Eta υποεκτιμούσε το μέγεθος του σφάλματος σε σχέση με το CIRP WRF (Cheng et al., 2005).

Οι καταστροφικοί τυφώνες στον Κόλπο του Μεξικού το 2005 έδωσαν την ευκαιρία στους Wang et al 2006, να αξιολογήσουν και αυτοί τις προγνώσεις του WRF, αυτή την φορά όμως με τον δυναμικό πυρήνα ARW. Χρησιμοποιήθηκαν δυο εκδόσεις του μοντέλου, μια με πλέγμα 12km και μια με πλέγμα των 12km και των 4km, όπου των 4km μετακινούνταν για να διατηρεί των τυφώνα στο κέντρο. Το μοντέλο έτρεχε μια ή δυο φορές την ημέρα, ανάλογα με τη σοβαρότητα της καταιγίδας. Το εύρος και η ένταση των προβλέψεων επαληθεύτηκαν με επιχειρησιακή πρόγνωση. Το εύρος είχε οριστεί ως η ελάχιστη τιμή της πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας και η ένταση της καταιγίδας μετριόταν με την ταχύτητα του ανέμου στα 10km. Τα αποτελέσματα της επαλήθευσης για τις προβλέψεις του εύρους στα 12km έδειξαν ότι τα σφάλματα ήταν συγκρίσιμα με άλλα μοντέλα μεταξύ των προβλέψεων 12 και 48 ωρών και αυξάνονταν από 34nm σε 72nm αντίστοιχα. Για τις προγνώσεις του εύρους στα 4km, τα σφάλματα ήταν παρόμοια με άλλων επιχειρησιακών μοντέλων. Σε αντίθεση με το εύρος οι προβλέψεις για την ένταση της καταιγίδας ήταν χειρότερη του μοντέλου ARW από άλλα μοντέλα, αλλά με την αύξηση του χρόνου προϋπολογισμού το σφάλμα βελτιωνόταν. Τέλος στο πλέγμα των 4km η ένταση είχε συγκρίσιμα αποτελέσματα με άλλα επιχειρησιακά μοντέλα (Wang et al., 2006).

Το μοντέλο WRF συνεχίζει να αξιολογείται συγκρινόμενο με άλλα μοντέλα, αφού και ο Grantinger 2007, αξιολόγησε τις προβλέψεις του αφού τις σύγκρινε με αυτές των ECMWF T799 και HIRLAM (11km και 5km), πάνω από την περιοχή της Ευρώπης (Σκανδιναβία) και της Αφρικής, από τον Ιούλιο του 2007 έως και τα μέσα Νοεμβρίου του ίδιου έτους. Η αξιολόγηση έγινε βάση τριών μεγεθών της θερμοκρασίας στα 2m, της ταχύτητας του ανέμου στα 10m, στην πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας και της 12ωρης

κατακρήμνιση. Για την Σκανδιναβία χρησιμοποιήθηκε πλέγμα 9km και 3km και για την Αφρική 27km. Τα αποτελέσματα για την Σκανδιναβία έδειξαν ότι το WRF έδωσε καλά αποτελέσματα όσο αναφορά την ταχύτητα του ανέμου και τα κατακρημνίσματα. Η θερμοκρασία είχε πολλές διακυμάνσεις και το WRF έδινε υψηλότερες τιμές στο RMSE. Το θετικό σφάλμα, κυρίως λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών στη βόρεια Σουηδία τον Νοέμβριο του 2007, φανέρωσε ότι το ECMWF ήταν καλύτερο από το WRF. Οι τιμές για την πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας έδωσαν θετικό σφάλμα και χαμηλή τιμή στη RMSE. Η σύγκριση του WRF με το HIRLAM των 11km έδειξε ότι το WRF ήταν καλύτερο τόσο για την πρόβλεψη της πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας όσο και για τις προβλέψεις των θερμοκρασιών του χειμώνα στο βορρά. Οι προβλέψεις για τα κατακρημνίσματα έδειξαν ότι το WRF υπερερούσε εξαιτίας του υψηλού θετικού σφάλματος. Τα αποτελέσματα, από την σύγκριση του WRF των 3km με το HIRLAM των 5km, ήταν παρόμοια για την νότια Σουηδία. Όσο αναφορά την αξιολόγηση του μοντέλου πάνω από την περιοχή της Αφρικής, τα αποτελέσματα ήταν παρόμοια για την θερμοκρασία και την πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας, αλλά και για την ταχύτητα του ανέμου, όπου το WRF είχε μεγαλύτερο θετικό σφάλμα. Τέλος το WRF είχε καλύτερα αποτελέσματα από το European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) T799 για την πρόβλεψη των κατακρημνισμάτων (Grantinger, 2007).

Τρία χρόνια μετά και χωρίς την μέθοδο της σύγκρισης αποτελεσμάτων μεταξύ των μοντέλων, οι Mercader et al 2010, αξιολόγησαν το WRF-ARW πάνω από την περιοχή της Καταλονίας, για την περίοδο των βροχοπτώσεων από το 2006-2007. Τα υπό εξέταση μεγέθη ήταν η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, ο άνεμος και η βροχόπτωση σε πλέγμα των 36km και 12 km. Για τα 36km η μέθοδος που χρησιμοποίησαν ήταν η επαλήθευση πλέγμα προς πλέγμα και σημείο προς σημείο, ενώ για τα 12km χρησιμοποιήθηκαν οι κατακόρυφες παρατηρήσεις από τρεις σταθμούς, καθώς και η επαλήθευση της ποσοστιαίας πρόβλεψης κατακρημνίσεων (quantitative precipitation forecast - QPF). Στο πλέγμα των 36km το σφάλμα της θερμοκρασίας αυξανόταν, αλλά μειωνόταν με το ύψος μεταξύ των ανωτέρων επιπέδων. Παρόμοια αποτελέσματα έδωσε

και το σφάλμα του ανέμου. Τα αποτελέσματα της σχετικής υγρασίας ήταν πιο αντικειμενικά στα χαμηλότερα επίπεδα απ' ό,τι στα ανώτερα, που έτειναν να ήταν πιο υγρά. Οι δείκτες RMSE και ME αυξάνονται με το ύψος, αλλά οι διαφορές μεταξύ των διαμορφώσεων τους ήταν μικρές για να αποφασιστεί ποια διαμόρφωση έδινε τα καλύτερα αποτελέσματα. Τέλος στο πλέγμα των 12km, οι τιμές των RMSE για την θερμοκρασία ήταν χαμηλές, ενώ υπερεκτιμούταν σε ανώτερα επίπεδα. Αντίθετα σε χαμηλότερα εξαρτιόταν από την τοποθεσία. Το σφάλμα του ανέμου έτεινε να ήταν υψηλότερα στα κατώτερα και ανώτερα στρώματα απ' ό,τι στα μεσαία. Για την σχετική υγρασία ο δείκτης ME ήταν χαμηλός σε όλα τα επίπεδα, καθώς ο δείκτης RMSE έτεινε να αυξάνεται με το ύψος στα χαμηλότερα επίπεδα (Mercader et al., 2010).

Οι πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει μια μάλλον συστηματική τάση του WRF είναι να υπερεκτιμά την ταχύτητα του ανέμου στα 10 m και να υποεκτιμά την ημερήσια θερμοκρασία στα 2 m (Gozzini et al., 2008).

Το 2010 έγινε μια αξιολόγηση του μοντέλου WRF-NMM από τους Γκίκα κ.α. (2010), για την περίοδο από τον Αύγουστο του 2008 έως και τον Δεκέμβριο του 2009, για μια εκτεταμένη περιοχή που καλύπτει τμήμα της δυτικής, κεντρικής και νότιας Ευρώπης, το σύνολο της Μεσογειακής λεκάνης και τμήμα της βορείου Αφρικής. Τα προγνωστικά πεδία όπου βασίστηκε η αξιολόγησή ήταν η θερμοκρασία στα 2m, η ταχύτητα του ανέμου στα 10m και η ατμοσφαιρική πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας. Για την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων τα στατιστικά μεγέθη που εξετάστηκαν ήταν η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) το συστηματικό σφάλμα (bias). Με βάση τους παραπάνω στατιστικούς δείκτες τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μοντέλο ανταποκρίνεται ικανοποιητικά για όλη τη χρονική περίοδο και στα τρία πεδία που εξετάζονταν και τα στατιστικά σφάλματα που προέκυψαν θεωρήθηκαν αναμενόμενα και σε αποδεκτές τιμές (Γκίκα κ.α., 2010).

Η τελευταία και πιο πρόσφατη αξιολόγηση του μοντέλου ήταν αυτή που έγινε από την ομάδα δυναμικής της ατμόσφαιρας και του κλίματος του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου, χρησιμοποιώντας ως σημείο αναφοράς τις επιφανειακές μετρήσεις, που δίνονταν από το δίκτυο του Παγκόσμιου

Μετεωρολογικού Οργανισμού, από 900 σταθμούς προκειμένου να επιτευχθεί η αξιολόγηση και η σύγκριση τριών προγνωστικών πεδίων, της ταχύτητας του ανέμου στα 10m, της θερμοκρασίας στα 2m και της πίεσης στην μέση στάθμη της θάλασσας κάθε 3 ώρες και την συσσωρευμένη δωρη βροχόπτωση για τα έτη 2009 και 2010 πάνω από την περιοχή της Μεσογείου. Η διαδικασία αξιολόγησης έγινε με την εκτίμηση του συστηματικού σφάλματος (bias), της τετραγωνικής ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) και τις μετρήσεις προειδοποιήσεων για συνεχείς και διακριτές προβλέψεις. Οι τιμές της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας ήταν σταθερά υψηλότερες από τις μετρήσεις κατά 0,5°C, ενώ το βράδυ οι τιμές πρόβλεψης ήταν συνήθως μικρότερες από τις παρατηρήσεις κατά 0,7°C. Επίσης υπήρχε και μια γενική τάση υποεκτίμησης της θερμοκρασίας στα διάφορα υψόμετρα όπου βρίσκονταν οι σταθμοί, κάτι που μπορεί να αποδοθεί στην ανεπαρκή απεικόνιση του μοντέλου των χαρακτηριστικών του ανάγλυφου και ιδιαίτερα στις παράκτιες περιοχές. Επιπλέον, οι σταθμοί που βρίσκονται σε χαμηλότερο υψόμετρο συνέβαλαν στην υπερεκτίμηση της ταχύτητας του ανέμου, που μπορεί να σχετιζόταν με την απόκλιση του σημείου του πλέγματος στο μοντέλο με την πραγματική θέση του σταθμού. Τέλος η πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας φαινόταν να υποεκτιμάται συστηματικά σε ένα εύρος από 0,1 έως 0,5 hPa (Katsafados et al., 2011).

Ως συνέχεια της παραπάνω μελέτης οι στόχοι της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας είναι:

- η περιγραφή του μοντέλου περιορισμένης περιοχής WRF-NMM που εκτελείται επιχειρησιακά στο Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο και
- η στατιστική αξιολόγηση των προγνώσεων για την περίοδο 2010-2012.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν γίνεται η περιγραφή του μοντέλου WRF-NMM και των σχημάτων φυσικής που περιλαμβάνει. Στη συνέχεια αναλύεται η μεθοδολογία αξιολόγησης των προγνώσεων καθώς και η διαμόρφωση του μοντέλου για τις ανάγκες της αξιολόγησης. Στα δυο τελευταία κεφάλαια υπάρχουν τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των προγνώσεων για την περίοδο 2010-2012 και τα συμπεράσματα αυτών.

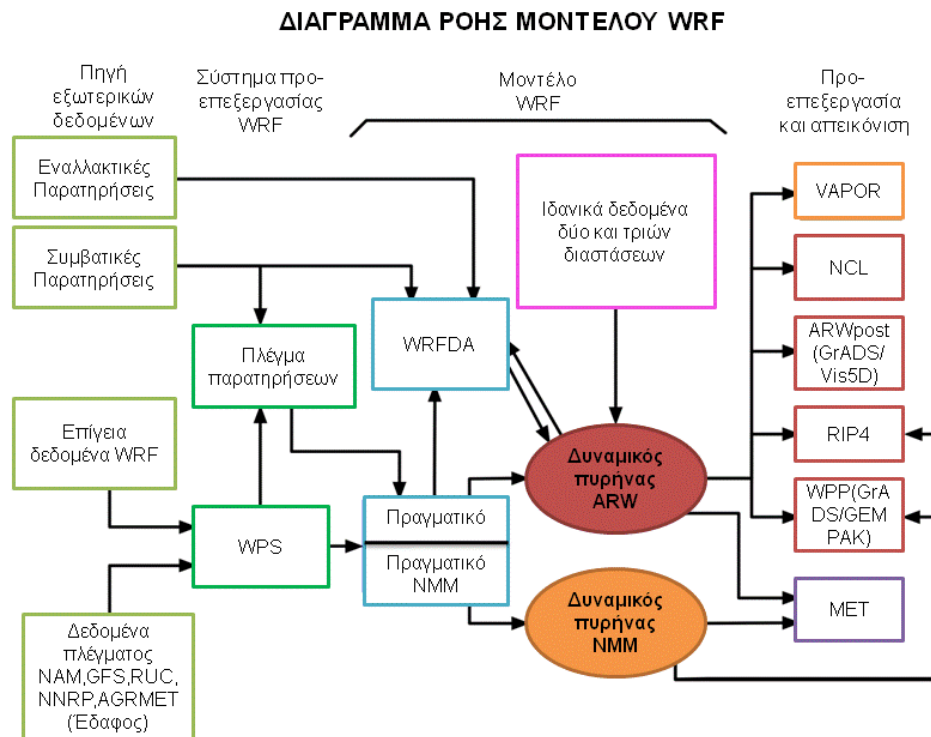
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Περιγραφή του μοντέλου WRF-NMM

2.1 Βασικές αρχές του μοντέλου

Τα μοντέλα πρόγνωσης καιρού βασίζονται στην περιγραφή των φυσικών διεργασιών με βάση τους νόμους διατήρησης της ορμής, της μάζας και της ενέργειας. Ένα τέτοιο μοντέλο είναι και το WRF, το οποίο χρησιμοποιείται είτε για επιχειρησιακή πρόγνωση, είτε για ανάγκες ατμοσφαιρικών ερευνών. Διαθέτει ποικιλία δυναμικών πυρήνων, ένα σύστημα αφομοίωσης δεδομένων τριών διαστάσεων και ένα λογισμικό που επιτρέπει παράλληλη επεξεργασία. Το χωρικό εύρος εφαρμογής του κυμαίνεται από εκατοντάδες μέτρα έως και εκατοντάδες χιλιόμετρα.

Στο Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο το WRF-NMM εκτελείται επιχειρησιακά και μπορεί να ακολουθήσει την υδροστατική προσέγγιση ή να ολοκληρωθεί μη υδροστατικά βασιζόμενο στον δυναμικό πυρήνα Non-hydrostatic Mesoscale Model (NMM). Στο *Σχήμα 2.1* που ακολουθεί φαίνεται το διάγραμμα ροής του συστήματος μοντελοποίησης WRF-NMM.



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα ροής του συστήματος μοντελοποίησης του WRF-NMM
 Πηγή: Janjic, 2008. Ιδία επεξεργασία

Οι βασικές αρχές τις οποίες ακολουθεί ο πυρήνας NMM είναι η αποτελεσματική αξιοποίηση της υπολογιστικής ισχύς, η χρήση των αρχών μοντελοποίησης, που υποδεικνύει η αριθμητική πρόγνωση, καθώς και εφαρμογών τοπικού κλίματος. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1 το μοντέλο δέχεται δεδομένα από εξωτερικές πηγές, όπως είναι τα προγνωστικά πεδία πλέγματος από μοντέλα αραιότερης διακριτικής ικανότητας. Στη συνέχεια τα δεδομένα περνάνε στο σύστημα προ-επεξεργασίας του μοντέλου όπου επιλέγεται και το πλέγμα που θα χρησιμοποιηθεί. Τέλος ανάλογα με τα αποτελέσματα που πρέπει να δώσει το μοντέλο, αλλά και με τον τρόπο που πρέπει να απεικονιστούν επιλέγεται ένας από τους δυναμικούς πυρήνες του WRF, είτε ο ARW, είτε ο NMM. Ο πυρήνας NMM χρησιμοποιεί την υδροστατική προσέγγιση, δηλαδή με την δυνατότητα προσαρμογής που έχει το μοντέλο επεκτείνεται σε μη υδροστατικές δραστηριότητες διατηρώντας τα χαρακτηριστικά της υδροστατικής προσέγγισης (Janjic, et al. 1977), οι μη υδροστατικές εξισώσεις χωρίζονται σε δυο μέρη, σε αυτό που αντιστοιχεί στο

υδροστατικό σύστημα και σε αυτό που επιτρέπει τον υπολογισμό των διορθώσεων του πρώτου μέρους (Janjic, et all., 2005), κάνοντας την σύγκριση των υδροστατικών και μη υδροστατικών λύσεων πιο εύκολη (Janjic, 2008). Επίσης χρειάζεται μικρότερη υπολογιστική ισχύ για μικρότερες αναλύσεις. Τέλος χρησιμοποιεί μεθόδους που ελαχιστοποιούν την παραγωγή μικρής κλίμακας θορύβων.

2.2 Κατακόρυφη συντεταγμένη και εξισώσεις

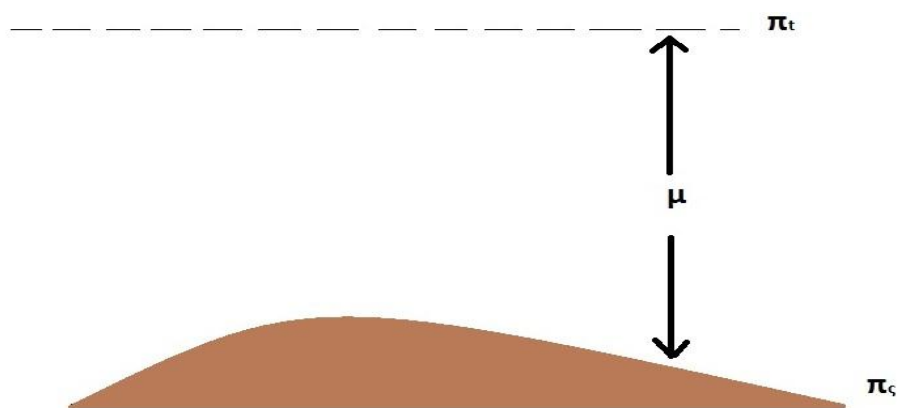
Η πιο γνωστή προσέγγιση για την αναπαράσταση της τοπογραφίας είναι η σ -συντεταγμένη. Με την προσέγγιση αυτή η συντεταγμένη των επιφανειών είναι επίπεδη πάνω και μακριά από τα βουνά, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2. Η κατακόρυφη συντεταγμένη είναι βασισμένη στη υδροστατική πίεση π , πάνω από τα 400 hPa, έτσι πιθανές ανακρίβειες που προέρχονται από τις κεκλιμένες επιφάνειες, περιορίζονται κατά το ήμισυ. Αξιοσημείωτο είναι ότι τα μεγαλύτερα σφάλματα στη σ -συντεταγμένη παρατηρούνται στην στρατόσφαιρα. Η σ -συντεταγμένη δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{\pi - \pi_t}{\mu} \quad \mu = \pi_s - \pi_t \quad (2.2.1)$$

όπου:

π_t : η πίεση στην κορυφή του μοντέλου ,

π_s : η πίεση στην επιφάνεια



Σχήμα 2.2: Η κατακόρυφη συντεταγμένη βασίζεται στην υδροστατική πίεση

Πηγή: Janjic, 2008.

Ιδία Επεξεργασία

Ανάλογα με ένα υδροστατικό σύστημα έχουμε την εξίσωση της ορμής

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -v \cdot \nabla_{\sigma} v - \sigma \frac{\partial v}{\partial \sigma} - (1 + \varepsilon) \nabla_{\sigma} \Phi - \alpha \nabla_{\sigma} p + f k v \quad (2.2.2)$$

Από την θερμοδυναμική εξίσωση έχουμε

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -v \cdot \nabla_{\sigma} T - \sigma \frac{\partial T}{\partial \sigma} + \frac{a}{c_p} \left[\frac{\partial T}{\partial \sigma} + v \cdot \nabla_{\sigma} p + \frac{\partial p}{\partial \sigma} \right] \quad (2.2.3)$$

Όμως :

$$a = RT/p \quad \varepsilon = \frac{1}{g} \frac{dw}{dt}$$

Όπου π είναι η υδροστατική πίεση και p είναι η μη υδροστατική πίεση.

Άρα η βασική εξίσωση του μοντέλου μπορεί να πάρει τη μορφή

$$w = \frac{1}{g} \frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{g} \left(\frac{d\Phi}{dt} + v \cdot \nabla_{\sigma} \Phi + \sigma \frac{d\Phi}{d\sigma} \right) = \frac{dz}{dt} \quad (2.2.4)$$

Όπου w είναι η κατακόρυφη ταχύτητα του ανέμου, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, Φ η γεωδυναμική, v η οριζόντια διεύθυνση του ανέμου, σ η κατακόρυφη συντεταγμένη που ακολουθεί την τοπογραφία του πεδίου ολοκλήρωσης και το z το ύψος της συντεταγμένης των επιφανειών (Janjic, 2008).

Επειδή όμως η γεωδυναμική υπολογίζεται από την υδροστατική πίεση, τη θερμοκρασία και την μη υδροστατική πίεση, το Φ , w και ε δεν είναι ανεξάρτητες μεταβλητές. Αυτό σημαίνει ότι μια ανεξάρτητη προγνωστική εξίσωση δεν θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατακόρυφη ταχύτητα του ανέμου, γιατί το σύστημα την ίδια μεταβλητή θα την υπολογίζει με διαφορετικούς τρόπους, με αποτέλεσμα η πρόγνωση να είναι άκυρη. Μια ακόμη σημαντική συνέπεια για την διακριτοποίηση είναι ότι η παράμετρος ε εισάγει μη υδροστατικές εξισώσεις με την βοήθεια του όρου $1+\varepsilon$, έτσι αν το ε είναι μηδέν το σύστημα ολοκληρώνεται με την υδροστατική προσέγγιση (Janjic et al., 2001, Janjic 2003).

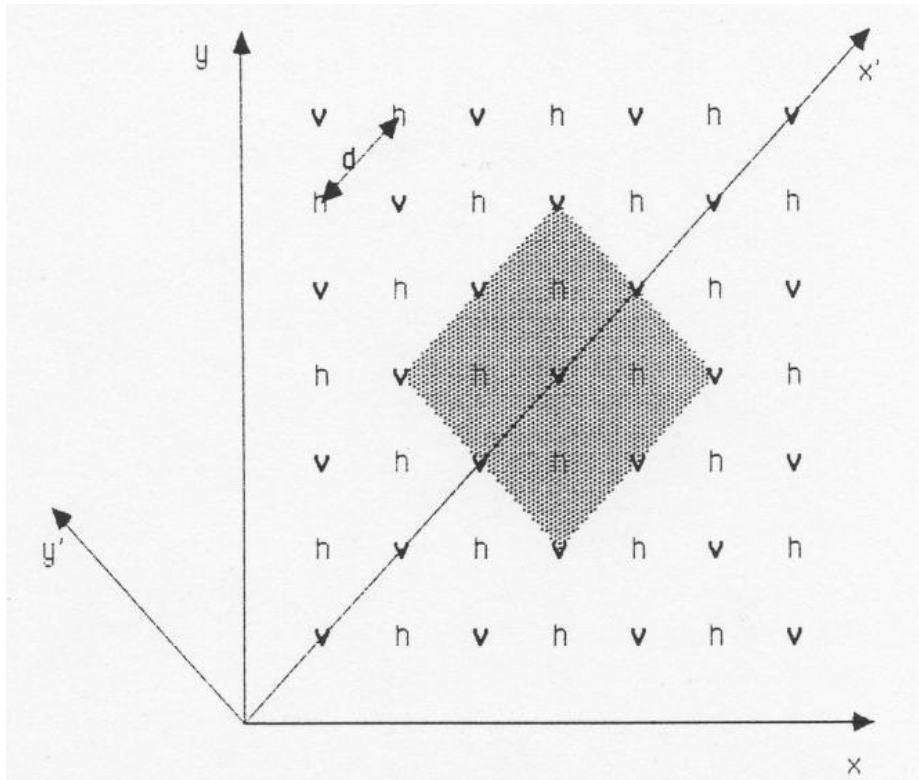
2.3 Οριζόντιο Πλέγμα

Το WRF είναι ένα αξιόπιστο σύστημα με σχετικά περιορισμένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, για την εκτίμηση ατμοσφαιρικών φαινομένων σε τοπικό επίπεδο. Η υπολογιστική του απόδοση είναι πολύ υψηλή από πολλών άλλων μη υδροστατικών μοντέλων, αφού έχει την δυνατότητα και για περεταίρω βελτιώσεις.

Οι προγνωστικές μεταβλητές που χρησιμοποιεί το WRF-NMM είναι :

- Μεταβλητές μάζας
 - $PD \rightarrow$ στήλη βάθους πίεσης (μεταβαλλόμενη συνιστώσα με το χρόνο και το χώρο) (Pa)
 - $T \rightarrow$ θερμοκρασία (K)
 - $Q \rightarrow$ ειδική υγρασία (gr Kg^{-1})
 - $CWM \rightarrow$ συνολική αναλογία μίγματος νερού (gr Kg^{-1})
 - $Q^2 \rightarrow$ τυρβώδης κινητική ενέργεια στο τετράγωνο (m^2s^{-1})
- Μεταβλητές ανέμου
 - $U, V \rightarrow$ οριζόντιες συνιστώσες του ανέμου (m s^{-1})

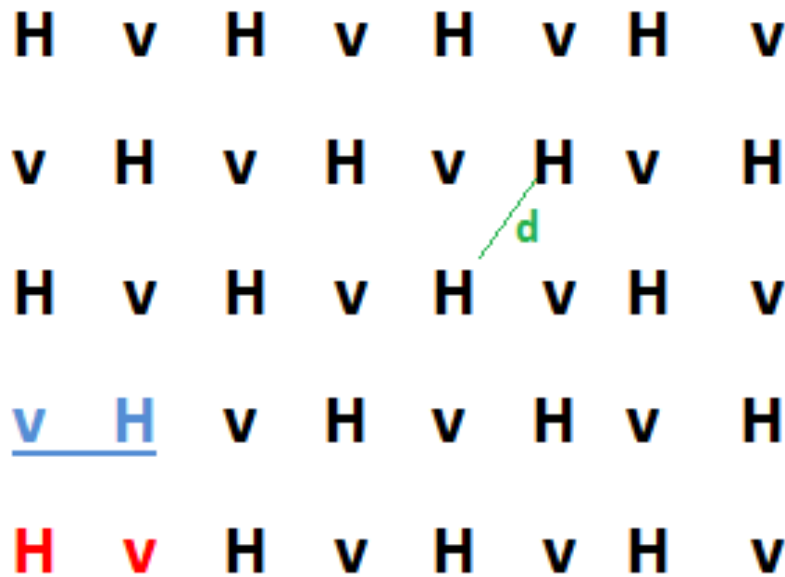
Η αριθμητική επίλυση του μοντέλου γίνεται στα σημεία semi-staggered πλέγματος τύπου E, το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3 (Katsafados et al., 2010). Το πλέγμα είναι τύπου E σε κύριο σύστημα συντεταγμένων (x,y) και δευτερεύον σύστημα συντεταγμένων (x',y') . Η ελάχιστη έκταση μεταξύ τεσσάρων σημείων του πλέγματος είναι η σκιασμένη περιοχή. Η απόσταση ανάμεσα σε δυο διαδοχικά σημεία του πλέγματος της ίδιας μεταβλητής είναι η απόσταση d .



Σχήμα 2.3: Πλέγμα τύπου E σε κύριο (x,y) και δευτερεύον (x',y') σύστημα συντεταγμένων. Η ελάχιστη έκταση μεταξύ τεσσάρων σημείων του πλέγματος είναι η σκιασμένη περιοχή. Η απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικά σημεία του πλέγματος της ίδιας μεταβλητής είναι η απόσταση d .

Πηγή: Κατσαφάδος κ.α., 2010.

Το h αναφέρεται τις μεταβλητές της θερμοκρασίας, της υγρασίας και της πίεσης, ενώ το v αναφέρεται στις συνιστώσες της ταχύτητας, οριζόντια και κατακόρυφη. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες, μήκος και πλάτος, περιστρέφονται στο πλέγμα του μοντέλου με τέτοιο τρόπο, ώστε η τομή του ισημερινού και του πρώτου μεσημβρινού να βρίσκεται πάντα στο κέντρο του πεδίου ολοκλήρωσης (Janjic, et al., 2005). Η περιστροφή αυτή ελαχιστοποιεί την σύγκλιση των μεσημβρινών πάνω από το πεδίο ολοκλήρωσης (Janjic, 2008). Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται μια περιοχή του πλέγματος τύπου E, στο οποίο επιλύει το μοντέλο WRF-NMM. Το μπλε σημείο έχει την τιμή (1,2), ενώ το κόκκινο σημείο έχει τιμή (1,1). Η τυπική απόσταση του πλέγματος είναι η διαγώνια απόσταση d .



Σχήμα 2.4: Πλέγμα τύπου E, το κόκκινο σημείο έχει την τιμή (1,1) και το μπλε έχει την τιμή (1,2).

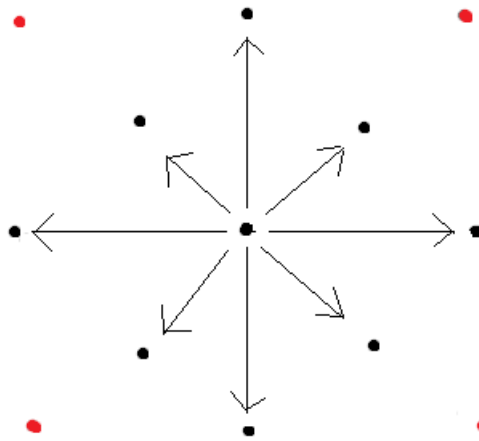
Πηγή: Janjic, 2008. Ιδία Επεξεργασία

2.4 Διακριτοποίηση

Οι αρχές διακριτοποίησης που εφαρμόζονται στον πυρήνα NMM , έχουν δοκιμαστεί και σε τρία παλιότερα υδροστατικά μοντέλα (Janjic, et al., 1977), και είναι οι εξής:

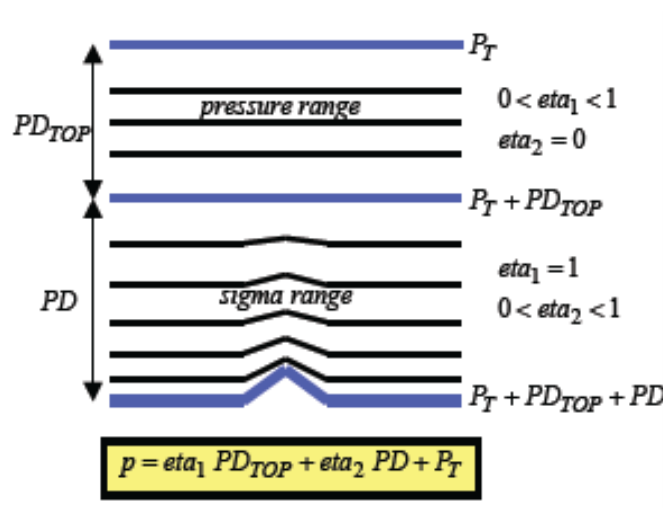
1. Η διατήρηση της ενέργειας και της ενστροφίας με σκοπό τον έλεγχο της μη γραμμικής ενέργειας,
2. Διατήρηση της ακρίβειας για τους τελεστές της οριζόντιας μεταφοράς και της απόκλισης καθώς και του όρου omega-alpha.
3. Η ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων που οφείλονται σε κεκλιμένες επιφάνειες.

Στην οριζόντια μεταφορά και την απόκλιση των συντελεστών όλα τα γειτονικά σημεία του πλέγματος επικοινωνούν μεταξύ τους όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Επικοινωνία γειτονικών σημείων κατά την οριζόντια μεταφορά, τα κόκκινα σημεία αντιστοιχούν στη μάζα ενώ τα μαύρα στον αέρα.
Πηγή: Janjic, 2008. Ιδία Επεξεργασία

Στην εγκατάσταση του μοντέλου στο Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο η κατακόρυφη διακριτοποίηση του μοντέλου ακολουθεί τη κάθετη σ -συντεταγμένη, όπως αυτή φαίνεται στο Σχήμα 2.6, μέχρι τα 400 hPa και την εφαρμογή ισοβαρικών επιπέδων από εκεί και πάνω (Κατσαφάδος κ.α., 2010).



Σχήμα 2.6: Η κατακόρυφη διακριτοποίηση του μοντέλου.
Πηγή: Janjic, 2008.

Σε περίπτωση εναλλαγής της ροής και των οριακών συνθηκών, το πλέγμα E διατηρεί τις παρακάτω ιδιότητες:

1. Την ενστροφία όπως ορίζεται από το πλέγμα C,
2. Την περιστροφική κινητική ενέργεια, όπως ορίζεται στο πλέγμα C,
3. Την περιστροφική κινητική ενέργεια, όπως ορίζεται στο πλέγμα E και
4. Την περιστροφική ορμή, όπως ορίζεται στο πλέγμα E και C.

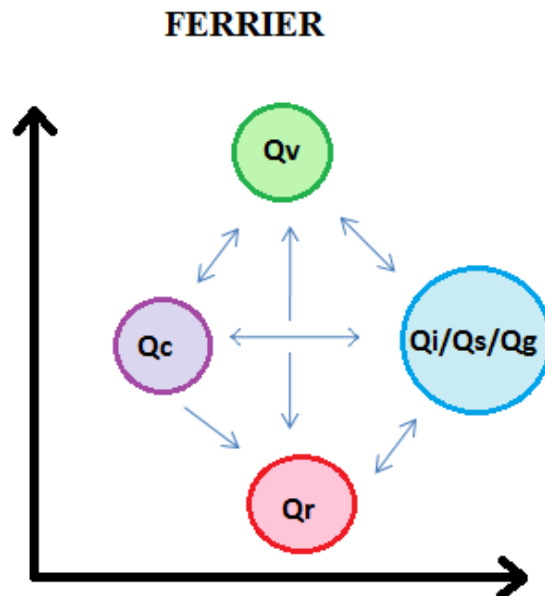
2.5 Σχήματα φυσικής

Το μοντέλο έχει αποδειχθεί αξιόπιστο αφού διαθέτει λειτουργίες υψηλής ανάλυσης και δύσκολα μπορεί να συγκριθεί με προηγούμενα μοντέλα, όπως το Eta, παρ' όλα αυτά όμως παραδείγματα δείχνουν ότι το WRF-NMM είναι καλό και ιδιαίτερα για έντονο ανάγλυφο (Black, et al., 2002). Επίσης είναι απαλλαγμένα από τα λάθη της σ-συντεταγμένης, που είναι μεγαλύτερη στα μεγάλα υψόμετρα (Janjic, et al., 2005). Ο πυρήνας NMM έχει δυο εκδόσεις, την παράλληλη έκδοση με το πλέγμα E και την έκδοση για υπολογιστές με το πλέγμα B (NMM-B). Και οι δυο εκδόσεις είναι σχεδιάστηκαν με τις ίδιες ακριβώς αρχές διακριτοποίησης της δυναμικής του μοντέλου και με τα ίδια πακέτα φυσικής.

Τα σχήματα φυσικής που περιλαμβάνει το μοντέλο είναι (Κουκούλα, 2011):

- Για την μικροφυσική χρησιμοποιείται το σχήμα Ferrier (Ferrier et al., 2002), το οποίο έχει σχεδιαστεί για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα. Τα σχήματα μικροφυσικής επιλέγονται όταν δεν είναι ανάγκη να χρησιμοποιηθεί ένα σχήμα κρυστάλλων πάγου (χαλάζι) για αποστάσεις μεγαλύτερες από 10km , αφού ανοδικά ρεύματα που παράγουν χαλάζι δεν επιλύονται και ένα πιο απλό σχήμα μπορεί να δώσει παρόμοια αποτελέσματα. Επίσης κατά την επίλυση ενός μοναδικού ανοδικού ρεύματος θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα σχήμα κρυστάλλων πάγου (Dudhia, 2009). Το σχήμα Ferrier, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7, είναι ένα μικροφυσικό σχήμα double-moment bulk cloud, το οποίο

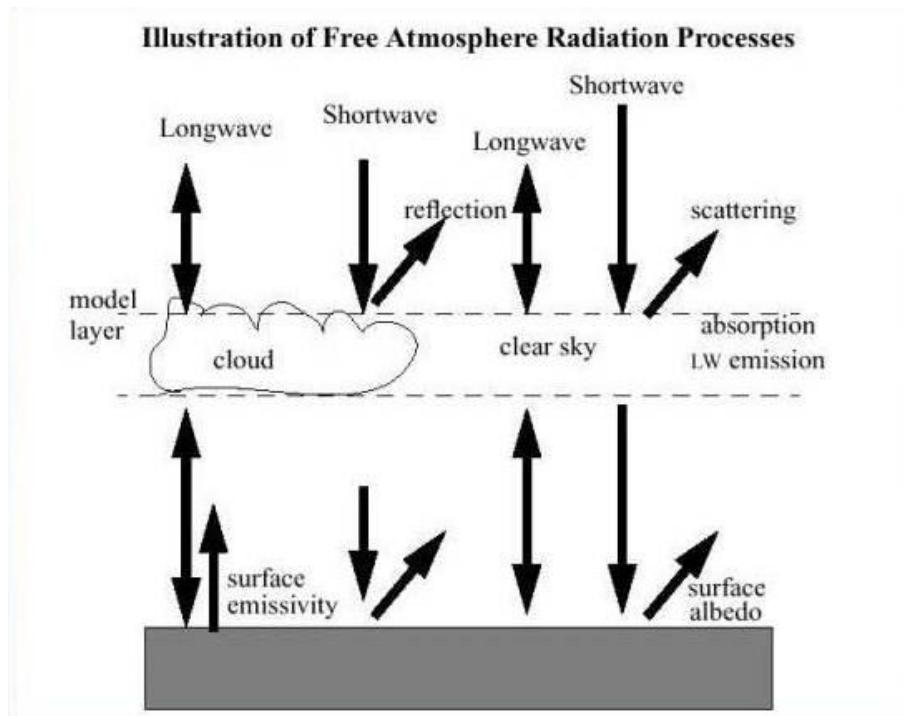
εκτιμά διάφορες μορφές συμπυκνώματος (condensate) με τη μορφή σύννεφων νερού, μικρών κρυστάλλων πάγου, βροχής και κατακρημνισμάτων σε μορφή πάγου. Τα κατακρημνίσματα σε μορφή πάγου είναι το χιόνι, χαλάζι και το χιονόνερο.



Σχήμα 2.7: Σχήμα μικροφυσικής Ferrier.

Πηγή: Dudhia, 2009. Ιδία Επεξεργασία

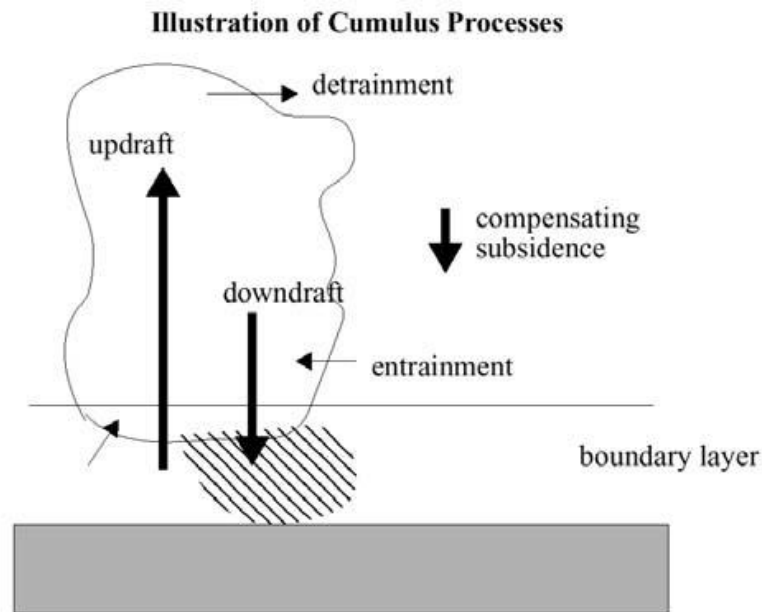
- Το ισοζύγιο ακτινοβολιών παραμετροποιείται με το σχήμα GFDL, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Είναι ένα σχήμα το οποίο χρησιμοποιείται από τα μοντέλα Eta και WRF-NMM. Ο προεπιλεγμένος κωδικός χρησιμοποιείται πάντα με το σχήμα μικροφυσικής του Ferrier. Στον πυρήνα NMM το σχήμα GFDL προτείνεται ανάλογα με τον αριθμό των θεμελιωδών βημάτων ανά κλήση ακτινοβολίας. Επίσης η επιχειρησιακή ρύθμιση θα πρέπει να είναι της τάξης 3600/dt, όπου dt το χρονικό βήμα ολοκλήρωσης του μοντέλου (Dudhia, 2009). Ακολουθεί την απλουστευμένη μέθοδο εναλλαγής των Fels και Schwarzkopf, με τον υπολογισμό σε φασματικές ζώνες που συνδέονται με το διοξείδιο του άνθρακα, τους υδρατμούς, και το όζον. Περιλαμβάνει τους συντελεστές εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα των Schwarzkopf και Fels, τα αποτελέσματα της επικάλυψης υδρατμών διοξειδίου του άνθρακα και της διόρθωσης γραμμικού σχήματος Voigt.



Σχήμα 2.8: Απεικόνιση διαδικασιών ακτινοβολίας .

Πηγή: Dudhia., 2009.

- Το σχήμα Betts-Miller-Janjic χρησιμοποιείται για τις διεργασίες των νεφών και βροχόπτωσης, όπου οι διεργασίες αυτές απεικονίζονται στο Σχήμα 2.9 (Janjic *et al.*, 2001, Janjic, 2003). Το σχήμα αυτό βασίζεται στο σχήμα κατακόρυφης μεταφοράς των Betts-Miller. Είναι ένα σχήμα το οποίο προσαρμόζεται ανάλογα με τον τύπο του συστήματος. Οι αρχικές τροποποιήσεις έγιναν από τον Janjic, και περιλαμβάνουν της εισαγωγής του σχήματος «cloud efficiency» έτσι ώστε να παρέχει έναν επιπλέον βαθμό ελευθερίας κατά τον καθορισμό των κατακόρυφων κατατομών της θερμότητας και της υγρασίας. Η χρήση του ενδείκνυται για αποστάσεις μεγαλύτερες ή ίσες των 10km, όπου χρειάζεται ένα σχήμα νεφών, για αποστάσεις μικρότερες ή ίσες των 3km δεν χρειάζεται κάποιο σχήμα. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις η ενεργοποίηση μεταφοράς νεφών είναι χρήσιμη. Για τις αποστάσεις μεταξύ των 3km και των 10km δεν έχει σχεδιαστεί κάποιο σχήμα. Τέλος υπάρχουν ζητήματα με τις διπλές εστίες όταν η φυσική διαφέρει απέναντι από τα όρια της εστίας, σε αυτή την περίπτωση καλό είναι να χρησιμοποιείται η ίδια φυσική και στους δυο τομείς.

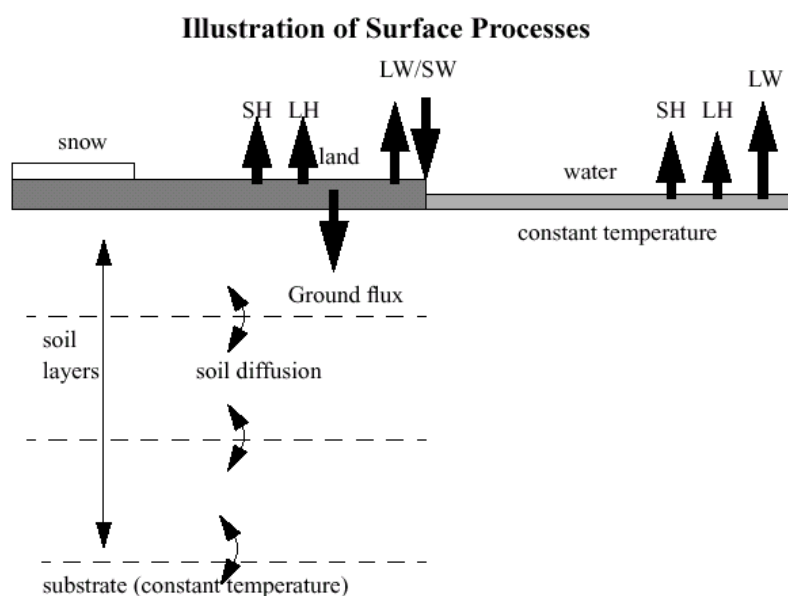


Σχήμα 2.9: Απεικόνιση διαδικασιών των νεφών.

Πηγή: Dudhia, 2009.

Η φυσική του επιφανειακού στρώματος παραμετροποιείται με το σχήμα Monin-Obukhov-Janjic. Αυτό το σχήμα περιλαμβάνει την παραμετροποίηση του ιζώδους υποστρώματος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.10. Είναι ένα από τα πιο σημαντικά σχήματα μικροφυσικής, αφού οι βασικές προγνώσεις που θα συγκριθούν με τις παρατηρήσεις προέρχονται από αυτό. Το σύστημα του επιφανειακού στρώματος υπολογίζει την ταχύτητα της τριβής και την ανταλλαγή συντελεστών που επιτρέπουν τον υπολογισμό της επιφανειακής θερμότητας και των ροών της υγρασίας από τα μοντέλα επιφανειακού εδάφους. Οι ροές αυτές έχουν χαμηλότερες οριακές συνθήκες για την κατακόρυφη μεταφορά που γίνεται στο σχήμα PBL (Bianco, 2008). Επίσης το επιφανειακό στρώμα αλληλεπιδρά με το σύστημα ακτινοβολίας, όπως με τη μικρή και μεγάλη κυματική ακτινοβολία που εκπέμπεται ή απορροφάται από την επιφάνεια της γης. Για τις υδάτινες επιφάνειες το ιζώδες υπόστρωμα παραμετροποιείται όπως προτείνεται από τον Janjic. Για την ξηρά, οι επιδράσεις του ιζώδους υποστρώματος λαμβάνονται υπόψη μέσω του ευμετάβλητου ύψους της θερμοκρασίας, και της υγρασίας όπως προτείνεται από τον Zilitinkevitch (1995). Η διόρθωση Beljaars (1994) εφαρμόζεται έτσι ώστε να αποφευχθούν ιδιομορφίες σε περιπτώσεις ασταθούς επιφανειακού στρώματος και άπνοιας. Οι επιφανειακές ροές υπολογίζονται με μία

επαναληπτική μέθοδο. Αυτό το σύστημα επιφανειακού στρώματος πρέπει να εκτελείται σε συνδυασμό με το Eta (Mellor-Yamada-Janjic) PBL σύστημα (Bianco, 2008).

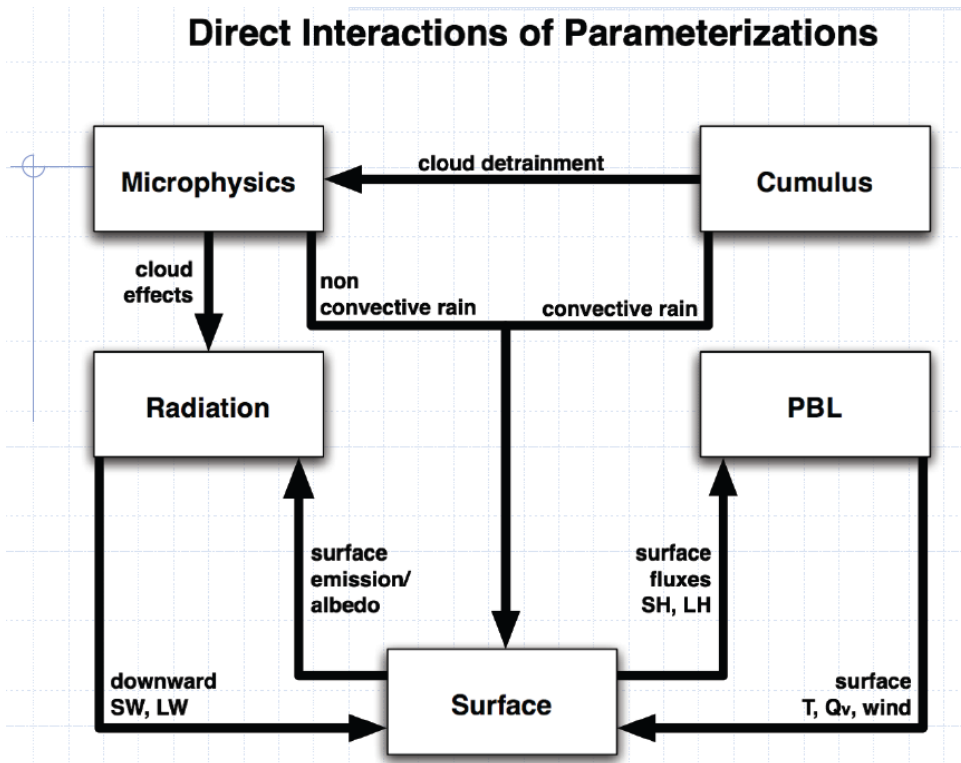


Σχήμα 2.10: Απεικόνιση επιφανειακών διαδικασιών .

Πηγή: Dudhia, 2009.

- Για την τυρβώδη κινητική ενέργεια του πλανητικού οριακού στρώματος χρησιμοποιείται το σχήμα Mellor-Yamada-Janjic (Janjic, 1996). Το σχήμα Planetary Boundary Layer (PBL) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τα περισσότερα μεγέθη πλέγματος, όταν οι επιφανειακές ροές είναι παρόν. Με το σχήμα PBL το πλήρες χαμηλότερο επίπεδο του μοντέλου (τιμή σ -συντεταγμένης) θα πρέπει να είναι 0,99 ή 0,995, όχι πολύ κοντά στο 1. Τέλος μπορεί να χρησιμοποιήσει τρισδιάστατη διάχυση αντί για σχήμα PBL, αυτό λειτουργεί καλύτερα όταν η οριζόντια προς την κατακόρυφη ανάλυση του πεδίου ολοκλήρωσης (dz/dx) είναι συγκρίσιμες.
- Υπομοντέλο εδάφους είναι το ενοποιημένο NOAH (Chen and Dudhia, 2000) σε 4 υπεδάφια στρώματα (0.10, 0.40, 1.0 και 2.0 m). Επίσης προβλέπει την κάλυψη χιονιού και υγρασίας και παρέχει τη θερμότητα και τις ροές υγρασίας για PBL. Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζεται το

διάγραμμα ροής ανάμεσα στα επιμέρους σχήματα του μοντέλου (Dudhia, 2009).



Σχήμα 2.11: Αλληλεπιδράσεις των παραμετροποιήσεων του επιμέρους σχημάτων του μοντέλου.

Πηγή: Κατσαφάδος κ.α., 2010

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Διαμόρφωση του μοντέλου και μεθοδολογία αξιολόγησης

3.1 Εισαγωγή

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η στατιστική αξιολόγηση των προγνώσεων του αριθμητικού, μη υδροστατικού μοντέλου WRF-NMM, που λειτουργεί επιχειρησιακά στο Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, για την περίοδο 2010 – 2012.

Τα πλεγματικά δεδομένα τα οποία εφαρμόστηκαν προέρχονται από το ατμοσφαιρικό μοντέλο WRF το οποίο έχει εγκατασταθεί και προσαρμοστεί, από την Ομάδα Δυναμικής της Ατμόσφαιρας και του Κλίματος (ΟΔΑΚ) του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου Αθηνών (ΧΠΑ), στις υπολογιστικές εγκαταστάσεις του Τμήματος Γεωγραφίας. Η αρχική εγκατάσταση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε το 2007 ενώ η επιχειρησιακή του λειτουργία σε καθημερινή βάση ξεκίνησε τον Ιούλιο του 2008 μετά από μεγάλη περίοδο δοκιμών και αξιολογήσεων των προγνώσεων. Πεδίο ολοκλήρωσης των προσομοιώσεων αποτελεί η ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου και της Ευρώπης ενώ ο χρονικός ορίζοντας των προγνωστικών προϊόντων είναι 120 ώρες. Τα κύρια προγνωστικά προϊόντα του μοντέλου περιλαμβάνουν την ατμοσφαιρική πίεση στη μέση στάθμη θάλασσας, την θερμοκρασία του ανέμου στα 2m, την ένταση του ανέμου στα 10m και τη βροχόπτωση.

3.2 Διαμόρφωση του μοντέλου και προγνωστικά προϊόντα

Η αρχική εγκατάσταση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε τον Ιανουάριο του 2008 ενώ η επιχειρησιακή του λειτουργία σε καθημερινή βάση ξεκίνησε τον Ιούλιο του 2008 μετά από μεγάλη περίοδο δοκιμών και αξιολογήσεων των προγνώσεων. Ο πρωτογενής κώδικας του μοντέλου αποτελείται από περίπου 5×10^7 γραμμές σε fortran95 και C και είναι πλήρως παραλληλοποιημένος ακολουθώντας το πρωτόκολλο Message Passing Interface (MPI).

Παραλληλοποιημένα είναι επίσης τα στάδια προεπεξεργασίας και μετεπεξεργασίας των δεδομένων εισόδου και εξόδου αντίστοιχα.

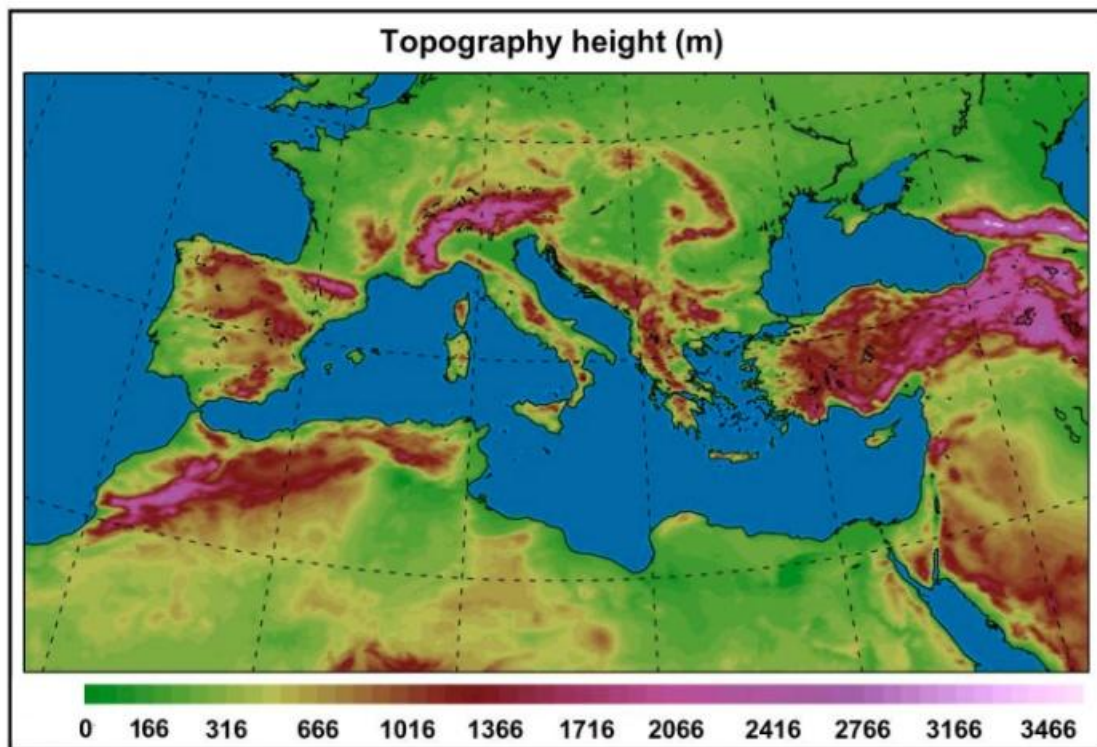
Οι αρχικές και οριακές συνθήκες του μοντέλου κατά την επιχειρησιακή του λειτουργία προέρχονται από το παγκόσμιο προγνωστικό σύστημα Global Forecasting System (GFS) των National Centers for Environmental Prediction (NCEP) σε ανάλυση $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ και χρονική διακριτοποίηση 3 ώρες. Εναλλακτικά έχουν χρησιμοποιηθεί πεδία ανάλυσης ή πρόγνωσης από το European Centre for Medium range Weather Forecast (ECMWF) καθώς και αναλύσεις του συστήματος αφομοίωσης δεδομένων (LAPS). Για την επιφανειακή θερμοκρασία θάλασσας χρησιμοποιούνται τα real-time-global (rtg) δεδομένα σε $0.083^{\circ} \times 0.083^{\circ}$ ανάλυση. Τα πρωτογενή αποτελέσματα των προσομοιώσεων μπορεί να είναι διαθέσιμα σε διάφορες μορφοποιήσεις, όπως binary, GRIB, GRIB2, NETCDF ενώ κατά τη φάση μετεπεξεργασίας των προγνωστικών προϊόντων η ακολουθούμενη οπτικοποίηση βασίζεται στο λογισμικό NCL με μορφοποίηση σε EPS/JPG/PNG (Κατσαφάδος κ.α., 2010).

Χαρακτηριστικά Μοντέλου	
Πρωτογενής Κώδικας	$5 \cdot 10^7$ γραμμές Fortran 95 και C
Πρωτόκολλο επικοινωνίας	Message Passing Interface
Ανάλυση αρχικών και οριακών τιμών	$0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$
Χρονική Διακριτοποίηση	3 ώρες
Επιφανειακή Θερμοκρασία Θάλασσας	Real Time Global $0,083^{\circ} \times 0,083^{\circ}$

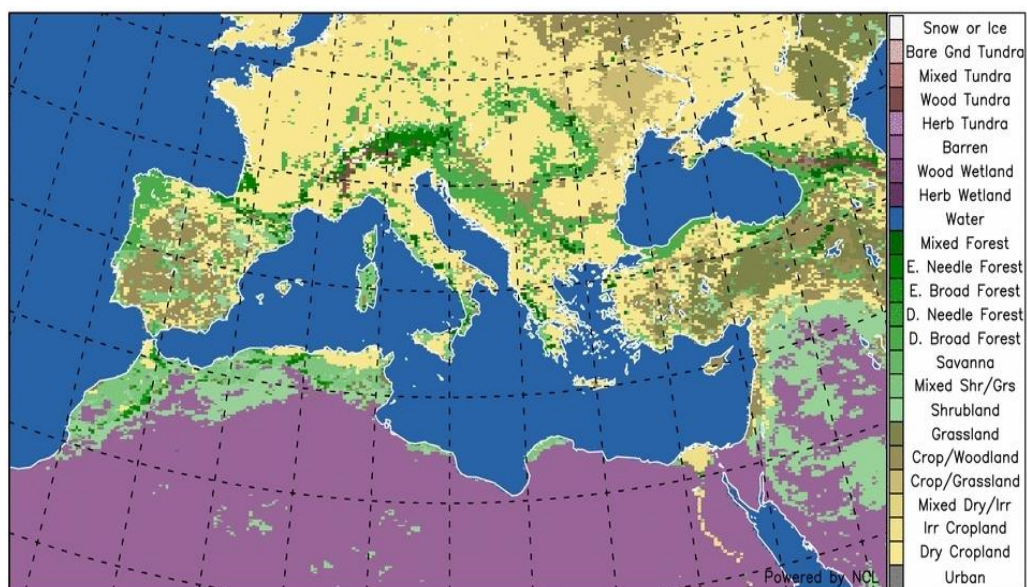
Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά μοντέλου

Πηγή: Ιδία Επεξεργασία

Πεδίο ολοκλήρωσης των προσομοιώσεων αποτελεί η ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου και της Ευρώπης ενώ ο χρονικός ορίζοντας των προγνωστικών προϊόντων είναι 120 ώρες. Τα δεδομένα υποβάθρου τοπογραφίας προέρχονται από το United States Geological Survey (USGS) Digital Elevation Model (DEM) σε αρχική ανάλυση 30×30 s ενώ τα δεδομένα υποβάθρου για χρήση γης και τύπο εδάφους προέρχονται από το USGS (24 κατηγορίες) και το Federal Agricultural Organization (16 κατηγορίες) αντίστοιχα σε ανάλυση 30×30 s (Katsafados et al., 2011).



Σχήμα 3.1: Τοπογραφία του πεδίου ολοκλήρωσης.
 Πηγή: Κατσαφάδος κ.α., 2010



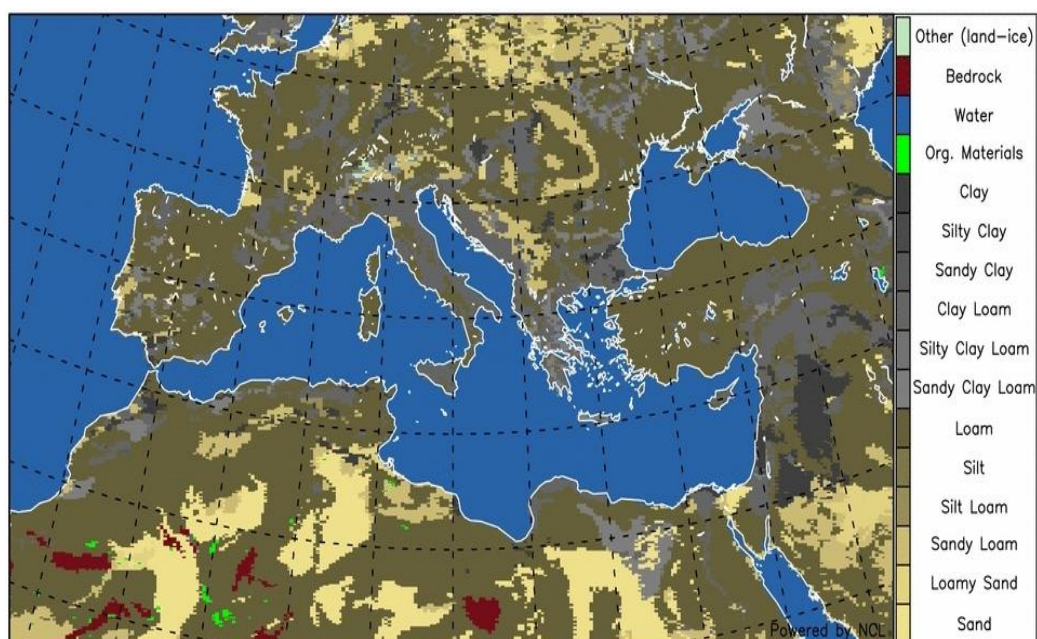
Σχήμα 3.2: Κατηγορίες βλάστησης (24) του πεδίου ολοκλήρωσης
 Πηγή: Κατσαφάδος κ.α., 2010

Κατηγορίες βλάστησης (24) του πεδίου ολοκλήρωσης	
Κατηγορία 1	Χιόνι ή Πάγος
Κατηγορία 2	Τούνδρα
Κατηγορία 3	Μικτή Τούνδρα
Κατηγορία 4	Τούνδρα με δέντρα
Κατηγορία 5	Τούνδρα με χόρτα
Κατηγορία 6	Άγονη Γη
Κατηγορία 7	Υγρότοπος με δέντρα
Κατηγορία 8	Υγρότοπος με χόρτα
Κατηγορία 9	Νερό
Κατηγορία 10	Μικτό Δάσος
Κατηγορία 11	Ε Πευκόδασος
Κατηγορία 12	Ε Αχανές Δάσος
Κατηγορία 13	Δ Πευκόδασος
Κατηγορία 14	Δ Αχανές Δάσος
Κατηγορία 15	Σαβάννα
Κατηγορία 16	Μικτή Περιοχή με θάμνους και λειμώνες (λιβάδι)
Κατηγορία 17	Θαμνώδης Περιοχή
Κατηγορία 18	Λειμώνας (Λιβάδι)
Κατηγορία 19	Καλλιέργειες/Δάσος
Κατηγορία 20	Καλλιέργειες/Λειμώνας
Κατηγορία 21	Μικτή Dry/Irr
Κατηγορία 22	Καλλιεργήσιμη Γη
Κατηγορία 23	Ξηρή Καλλιεργήσιμη Γη
Κατηγορία 24	Αστική Περιοχή

Πίνακας 3.2: Κατηγορίες βλάστησης (24) του πεδίου ολοκλήρωσης

Πηγή: Κατσαφάδος κ.α., 2010

Ιδία Επεξεργασία



Σχήμα 3.3: Είδη εδαφών (16) του πεδίου ολοκλήρωσης
Πηγή: Κατσαφάδος κ.α., 2010.

Είδη εδαφών (16) του πεδίου ολοκλήρωσης	
Κατηγορία 1	Άλλο (έδαφος-πάγος)
Κατηγορία 2	Βραχώδες Υπόστρωμα
Κατηγορία 3	Νερό
Κατηγορία 4	Οργανικά Υλικά
Κατηγορία 5	Άργιλος
Κατηγορία 6	Λασπώδης Άργιλος
Κατηγορία 7	Αμμώδης Άργιλος
Κατηγορία 8	Αργιλώδες Έδαφος
Κατηγορία 9	Λασπώδες-Αργιλώδες Έδαφος
Κατηγορία 10	Αμμώδες-Αργιλώδες Έδαφος
Κατηγορία 11	Μικτό Έδαφος
Κατηγορία 12	Πηλός
Κατηγορία 13	Μικτός Πηλός
Κατηγορία 14	Μικτή Άμμος
Κατηγορία 15	Αργιλώδης Άμμος
Κατηγορία 16	Άμμος

Πίνακας 3.3: Είδη εδαφών (16) του πεδίου ολοκλήρωσης
Πηγή: Κατσαφάδος κ.α., 2010
Ιδία Επεξεργασία

Στην εγκατάσταση του μοντέλου στο ΧΠΑ και για λόγους υπολογιστικής επάρκειας έχει επιλεγεί μονό πεδίο ολοκλήρωσης 305x273 σημείων, με 0.09°x0.09° οριζόντια διακριτοποίηση (~10 km), χρονικό βήμα ολοκλήρωσης 24sec και 38 ασύμμετρα κατακόρυφα επίπεδα από την επιφάνεια μέχρι τα 25 mb.

Προσαρμογή Χαρακτηριστικών Μοντέλου	
Πεδίο Ολοκλήρωσης	305x273
Οριζόντια Διακριτοποίηση	0,09°x0,09°
Χρονική Βήμα	24 sec
Κατακόρυφα Επίπεδα	38 ασύμμετρα επίπεδα μέχρι τα 25 mb

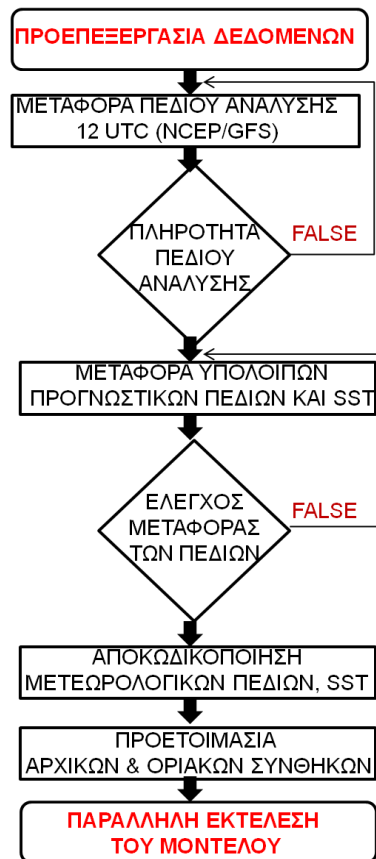
Πίνακας 3.4: Προσαρμογή Χαρακτηριστικών Μοντέλου

Πηγή: Ιδία Επεξεργασία

Η επιχειρησιακή διαδικασία των καθημερινών προσομοιώσεων αποτελείται από τρεις κύριες φάσεις (Κουκούλα, 2011):

- Τη φάση προ-επεξεργασίας των αρχικών και οριακών συνθηκών.
- Τη φάση εκτέλεσης του μοντέλου και παραγωγής πρωτογενών δεδομένων.
- Τη φάση μετεπεξεργασίας των προγνώσεων (αλλαγή προβολικού συστήματος στο οριζόντιο επίπεδο, παρεμβολή πεδίων σε προκαθορισμένα ισοβαρικά επίπεδα, εξαγωγή προγνωστικών χρονοσειρών, οπτικοποίηση).

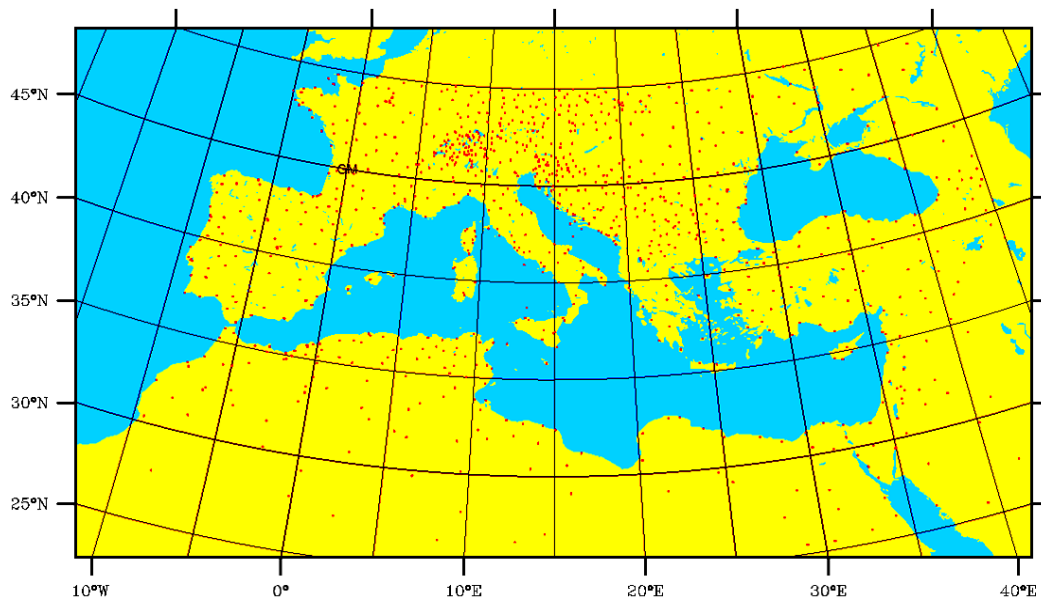
Η φάση προ-επεξεργασίας των δεδομένων παρουσιάζεται στο διάγραμμα του Σχήματος 3.5 και αποτελείται από σύνολο αλγορίθμων σε fortran95, C, perl και shell script για τη μεταφορά των πεδίων ανάλυσης και πρόγνωσης από το NCEP, τον έλεγχο της πληρότητάς τους, την αποκωδικοποίησή τους και την επαναπροβολή τους στα σημεία πλέγματος του πεδίου ολοκλήρωσης για την παραγωγή των αρχικών και οριακών συνθηκών του μοντέλου. Η προεπεξεργασία των δεδομένων διαρκεί περίπου 45 λεπτά, η παράλληλη εκτέλεση του μοντέλου σε 24 επεξεργαστές διαρκεί 3 ώρες ενώ η μετεπεξεργασία και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων διαρκεί πάνω από 1 ώρα (Κουκούλα,2011).



Σχήμα 3.5: Δομοδιάγραμμα της φάσης προεπεξεργασίας των δεδομένων.
Πηγή: Κατσαφάδος κ.α., 2010

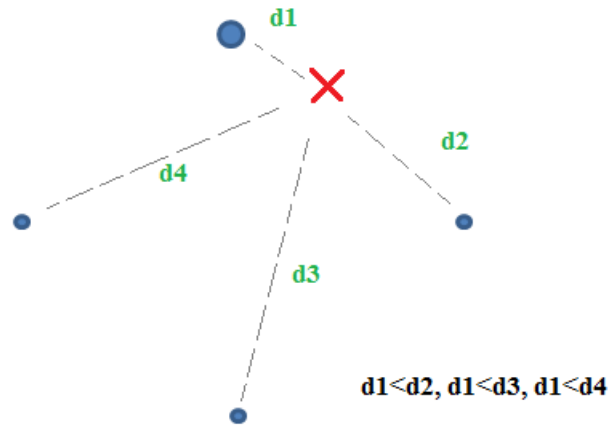
3.3 Μεθοδολογία

Η σύγκριση των προβλέψεων του WRF και των επιφανειακών παρατηρήσεων έγινε στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογειακής λεκάνης, με διαθέσιμους τους σταθμούς που φαίνονται στο σχήμα 3.6 (Katsafados et al., 2011). Η σύγκριση αυτή περιλαμβάνει περίπου 900 συμβατούς μετεωρολογικούς σταθμούς που προέρχονται από το Ευρωπαϊκό δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών του World Meteorological Organization (WMO) και παρέχονται από το European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF), με τις προγνωστικές τιμές του μοντέλου WRF-NMM. Οι μετεωρολογικοί παράμετροι που υπολογίστηκαν ήταν η θερμοκρασία στα 2m, η ένταση του ανέμου στα 10 m, η ατμοσφαιρική πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας και η βροχόπτωση.



Σχήμα 3.6: Πεδίο ολοκλήρωσης του μοντέλου WRF-NMM. Με τα σημεία κόκκινου χρώματος αποτυπώνονται οι θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών..
Πηγή: Κατσαφάδος κ.α., 2010

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η συλλογή των παρατηρήσεων και ταυτόχρονα αναπτύχθηκε κατάλληλο λογισμικό, προκειμένου αυτές να αντιστοιχισθούν με τις προγνωστικές ώρες του συστήματος αφ' ενός και αφ' ετέρου να αποκλειστούν εμφανώς λανθασμένες μετρήσεις. Οι γεωγραφικές θέσεις των σταθμών είναι σχεδόν απίθανο να συμπίπτουν με τις θέσεις των σημείων του πλέγματος του μοντέλου, για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε κατάλληλο λογισμικό ώστε να ληφθούν υπόψιν οι τιμές του πλησιέστερου γειτονικού προς το σταθμό παρατήρησης, σημείου του πλέγματος (Γκίκας κ.α., 2010). Στο Σχήμα 3.7 φαίνονται τα σημεία του πλέγματος του μοντέλου, με μπλε χρώμα και η θέση του σταθμού, με κόκκινο χρώμα, για την καλύτερη δυνατή σύγκριση το σημείο που θα επιλεχθεί είναι αυτό που απέχει από το σταθμό απόσταση d_1 .



Σχήμα 3.7: Απεικόνιση των αποστάσεων των σημείων πλέγματος και μετεωρολογικού σταθμού.
Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Επιπλέον έλεγχος εφαρμόστηκε προκειμένου να αποκλειστούν σημεία θεωρούμενα ως θαλάσσια από το μοντέλο (σε αυτή τη περίπτωση ελήφθησαν υπόψιν οι μετρήσεις του δεύτερου πλησιέστερου γειτονικού σημείου, ή σπανιότερα του τρίτου. Αφού δημιουργήθηκαν τα ζεύγη τιμών (παρατηρήσεων - προγνώσεων), για τις πρώτες 72 προγνωστικές ώρες του συστήματος, πραγματοποιήθηκε η στατιστική ανάλυση βάσει του συστηματικού σφάλματος (bias) και της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE).

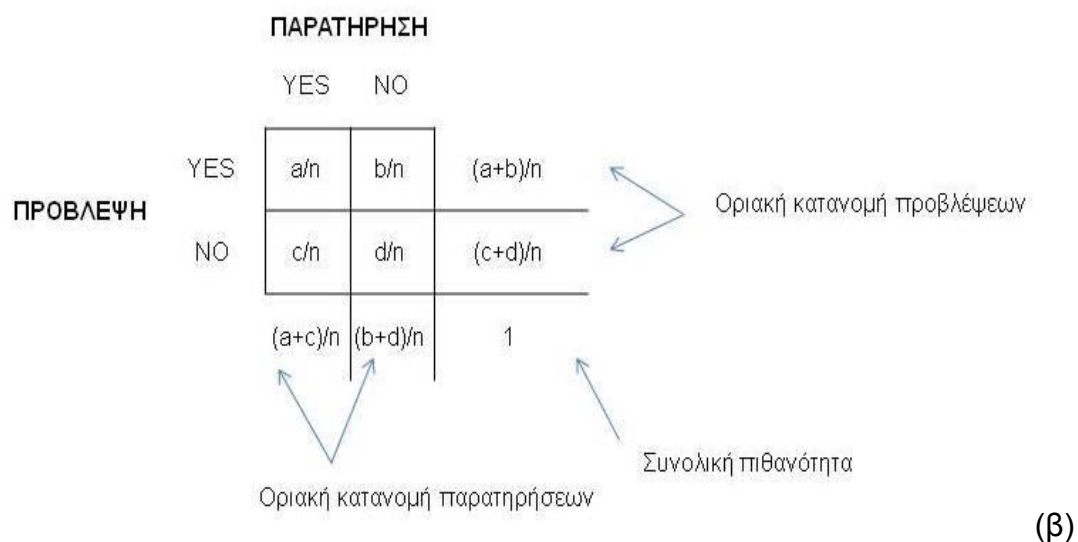
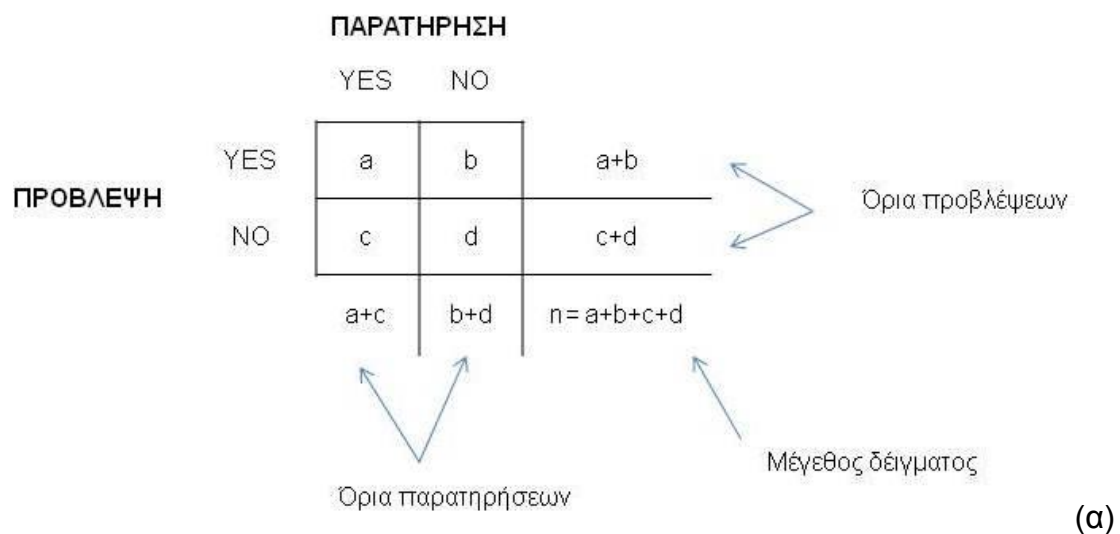
$$bias = \frac{\sum_T (F - O)}{T} \quad (3.3.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_T (F - O)^2}{T}} \quad (3.3.2)$$

όπου F : η προγνωστική τιμή, O : η τιμή της παρατήρησης και T : το πλήθος των ζευγών (Papadopoulos and Katsafados, 2009).

Σε περίπτωση που το $bias < 0$ το μοντέλο υποεκτιμά το σύνολο των τιμών της μεταβλητής αυτής, ενώ σε περίπτωση που το $bias > 0$, το μοντέλο εμφανίζει υπερεκτίμηση. Επιπλέον, ο δείκτης σφάλματος RMSE, που προκύπτει από τη σχέση (3.3.2), είναι ένας από τους πλέον διαδεδομένους για την εκτίμηση της ακρίβειας και λαμβάνει τιμές από μηδέν έως άπειρο (Wilks, 1995).

Τα αποτελέσματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται για την βροχόπτωση προκύπτουν από την χρήση της προσέγγισης του πίνακα έκτακτης ανάγκης (Wilks,1995). Αυτός είναι ένας δισδιάστατος πίνακας, όπου κάθε στοιχείο εκτιμά τον αριθμό των περιστατικών στα οποία οι μετρήσεις του μετρητή και των προβλέψεων του μοντέλου υπερβαίνουν ή αποτυγχάνουν να φθάνουν ένα ορισμένο όριο για μια δεδομένη περίοδο των προβλέψεων (Papadopoulos and Katsafados, 2009).



Πίνακας 3.3: Πίνακες έκτακτης ανάγκης
 Πηγή: Wilks, 1995. Ιδία Επεξεργασία

Τα στοιχεία του πίνακα ορίζονται ως εξής: το A είναι η πρόβλεψη του μοντέλου και η μέτρηση του μετρητή αν υπερέβη το όριο. Το B είναι η πρόγνωση του μοντέλου αν υπερέβη το όριο, αλλά όχι η μέτρηση του μετρητή. Το C είναι η πρόβλεψη του μοντέλου που δεν αγγίζει το όριο, αλλά η μέτρηση το ξεπερνά. Και το D είναι η πρόβλεψη του μοντέλου και της μέτρησης που δεν φτάνει το όριο. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω στοιχεία η ικανότητα πρόβλεψης μπορεί να μετρηθεί με την αξιολόγηση του βαθμού συστηματικού σφάλματος (bias score-BS) και του βαθμού ισοδύναμης προειδοποίησης (equitable threat score-ETS). Ο βαθμός συστηματικού σφάλματος ορίζεται ως:

$$BS = \frac{(A+B)}{(A+C)} \quad (3.3.3)$$

ενώ ο βαθμός ισοδύναμης προειδοποίησης ορίζεται ως:

$$ETS = \frac{(A-E)}{(A+B+\Gamma-E)} \quad (3.3.4)$$

Όπου το E προέρχεται από την $E = [(A+B) \cdot (A+\Gamma)] / N$, με N κρατώντας το συνολικό αριθμό των παρατηρήσεων επαληθεύεται $N = A + B + \Gamma + \Delta$. Η εισαγωγή του όρου E είναι ένα εξάρτημα στον κανονικό βαθμό απειλής (Wilks, 1995), δεδομένου ότι μειώνει τον αριθμό των τυχαίων προβλέψεων. Για να μετρηθεί το μέγεθος της διαφοράς μεταξύ των προβλέψεων του μοντέλου και της παρατηρούμενης βροχόπτωσης υπολογίζεται η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NOBS} (MP_i - OP_i)^2}{NOBS}} \quad (3.3.5)$$

Όπου MP_i και OP_i , είναι η εκτίμηση του μοντέλου και η παρατηρούμενη βροχόπτωσης, αντίστοιχα και $NOBS$ είναι ο συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων σε μια συγκεκριμένη θέση η οποία φθάνει ή υπερβαίνει ένα

ορισμένο όριο. Τα παραπάνω στατιστικά κριτήρια έχουν συνδυαστεί για να παρέχουν μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση των επιδόσεων και της σύγκρισης. Μια συχνά χρησιμοποιούμενη εναλλακτική λύση για το ποσοστό επιτυχίας είναι ο βαθμός προειδοποίησης (Threat Score-TS), όπως μπορεί να οριστεί από τον πίνακα 3.3(α):

$$TS = \frac{A}{A+B+\Gamma} \quad (3.3.6)$$

Ο βαθμός προειδοποίησης είναι ο αριθμός των σωστών προβλέψεων και διαιρείται με το συνολικό αριθμό των περιπτώσεων όπου η πρόβλεψη μπορεί να παρατηρηθεί. Ο χειρότερος δυνατός βαθμός προειδοποίησης είναι μηδέν, και το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα είναι μία προειδοποίηση.

Υπάρχουν δύο ακόμη μέτρα που υπολογίζονται για δεδομένα επαλήθευσης 2x2. Το πρώτο μέτρο είναι η πιθανότητα ανίχνευσης (Probability Of Detection-POD), η οποία αναφέρεται σε παλαιότερη βιβλιογραφία ως πρόβλεψη. Η POD είναι η πιθανότητα ότι το συμβάν θα μπορούσε να προβλεφθεί, δεδομένου ότι αυτό συνέβη, η πιθανότητα ανίχνευσης υπολογίζεται ως:

$$POD = \frac{A}{A + \Gamma} \quad (3.3.7)$$

Η POD για τέλεια προβλέψεις είναι 1 και η χειρότερη είναι 0.

Το δεύτερο μέτρο είναι ο δείκτης ψεύτικων προειδοποιήσεων (False Alarm Rate-FAR) είναι το ποσοστό των προβλέψεων που αποτυγχάνουν να υλοποιηθούν. Αυτό είναι ένα στοιχείο της υπό όρους κατανομής των γεγονότων, δεδομένης της πρόβλεψης και υπολογίζεται ως:

$$FAR = \frac{B}{A + B} \quad (3.3.8)$$

Ο FAR έχει αρνητικό προσανατολισμό και θα πρέπει να προτιμώνται οι μικρότερες τιμές του. Ο καλύτερος δυνατός είναι FAR είναι μηδέν και ο χειρότερος το ένα.

Για την σύγκριση των τιμών μεταξύ των προβλέψεων και των παρατηρήσεων, αλλά και την διεξαγωγή συμπερασμάτων έχουν αναπτυχθεί διαδικασίες με σκοπό την επεξεργασία περισσότερων από 1Tb πλεγματικών δεδομένων και την εξαγωγή στατιστικών μεταβλητών, ενώ οι χάρτες και τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν με την χρήση του λογισμικού NCL.

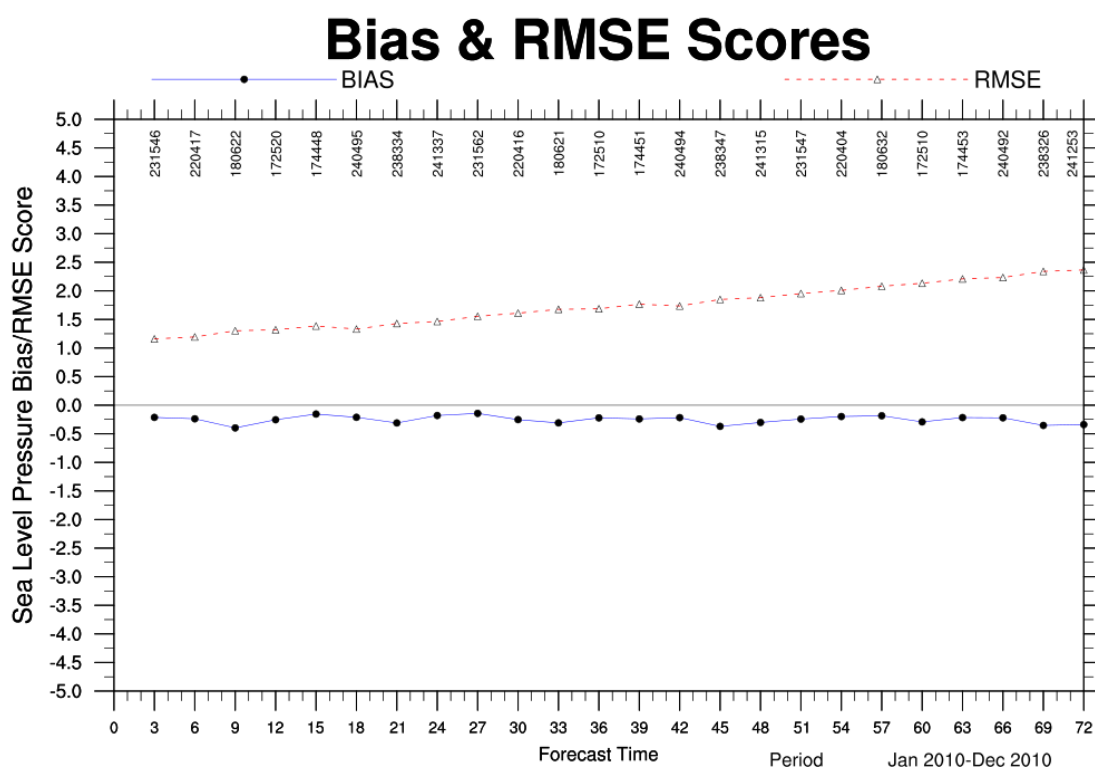
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα από την σύγκριση των ζευγών πρόγνωσης και παρατήρησης. Τα στατιστικά μεγέθη RMSE και bias εκτιμήθηκαν για το σύνολο των σταθμών επιφανείας για τα έτη 2010, 2011 και 2012 και αφορούν την ατμοσφαιρική πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας (ΜΣΘ), την θερμοκρασία του αέρα στα 2m, την ένταση του ανέμου στα 10m και την δωρη αθροιστική βροχόπτωση.

4.1 Ατμοσφαιρική πίεση ΜΣΘ

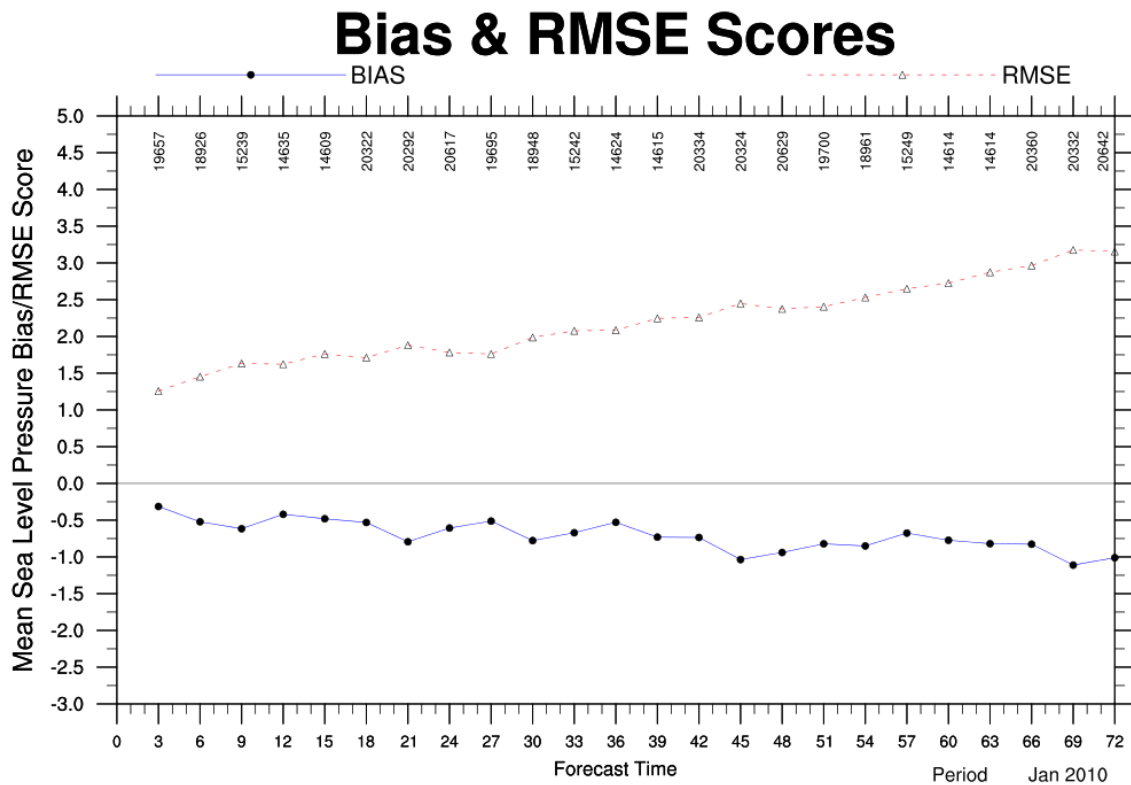
Η ατμοσφαιρική πίεση της ΜΣΘ για το σύνολο του έτους 2010 παρουσιάζει μια σταδιακή αύξηση του RMSE σε σχέση με τον προγνωστικό χρόνο, πράγμα που υποδηλώνει την εξάρτηση της ατμοσφαιρικής πίεσης από την προγνωστικότητα. Το bias αν και κινείται πολύ κοντά στο 0, εμφανίζει υποεκτίμηση κυρίως τις πρωινές ώρες, που φτάνει μέχρι 0,5 hPa, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της ατμοσφαιρικής πίεσης στη ΜΣΘ για το έτος 2010. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

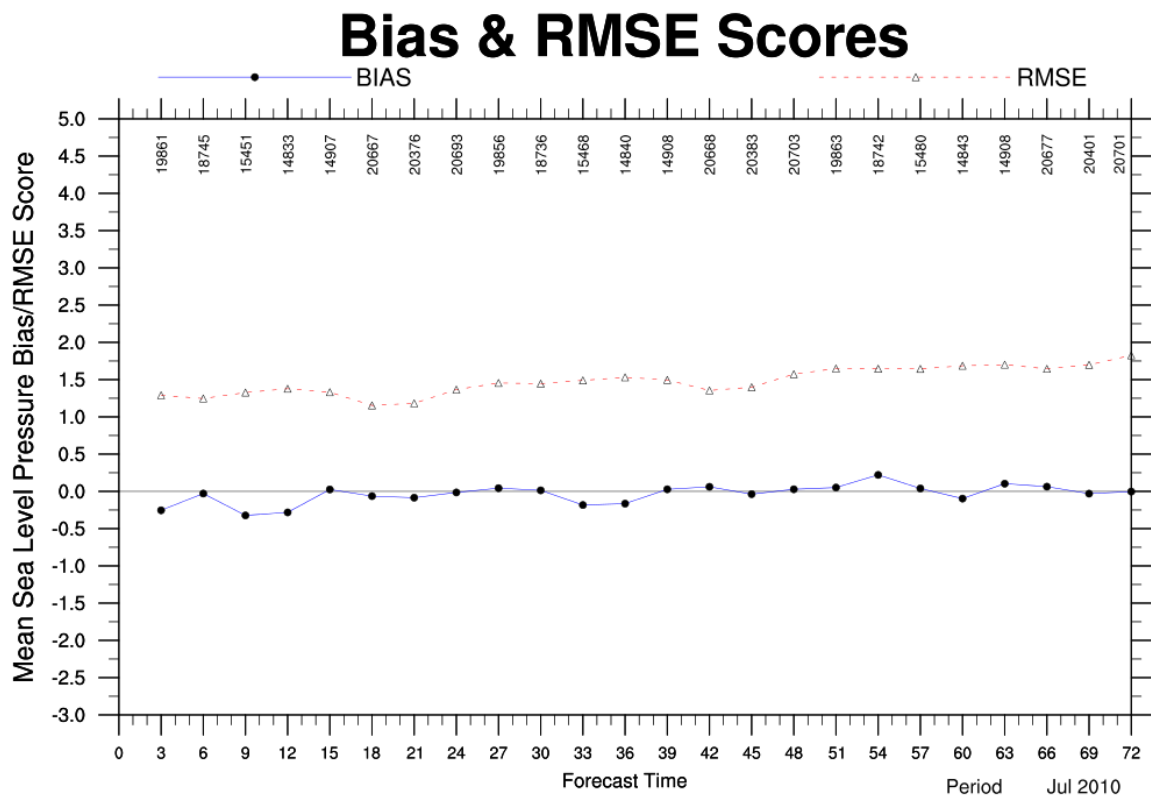
Η εικόνα όλων των μηνών του έτους δεν έχει μεγάλες αποκλίσεις από την συνολική εικόνα, εκτός από τους μήνες Ιανουάριο, Ιούλιο και Αύγουστο. Τον Ιανουάριο του 2010, όπως δείχνει και το Σχήμα 4.2, η υποεκτίμηση του συστηματικού σφάλματος είναι αρκετά μεγάλη αφού κατά τις μεσημεριανές ώρες φτάνει έως 1,0 hPa. Το RMSE κινείται αυξητικά σε σχέση με τον προγνωστικό χρόνο με απότομη κλίση μετά την 27^η προγνωστική ώρα και κυμαίνεται από 1,25 hPa έως 3,25 hPa. Αυτό οφείλεται στο ότι κατά την διάρκεια του χειμώνα υπάρχει μεγαλύτερη κινητικότητα των ατμοσφαιρικών διαταραχών, όπου παρατηρούνται χαμηλές θερμοκρασίες και χαμηλότερες πιέσεις (Κατσαφάδος κ.α., 2012).



Σχήμα 4.2: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της ατμοσφαιρικής πίεσης στη ΜΣΘ, Ιανουάριος 2010. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

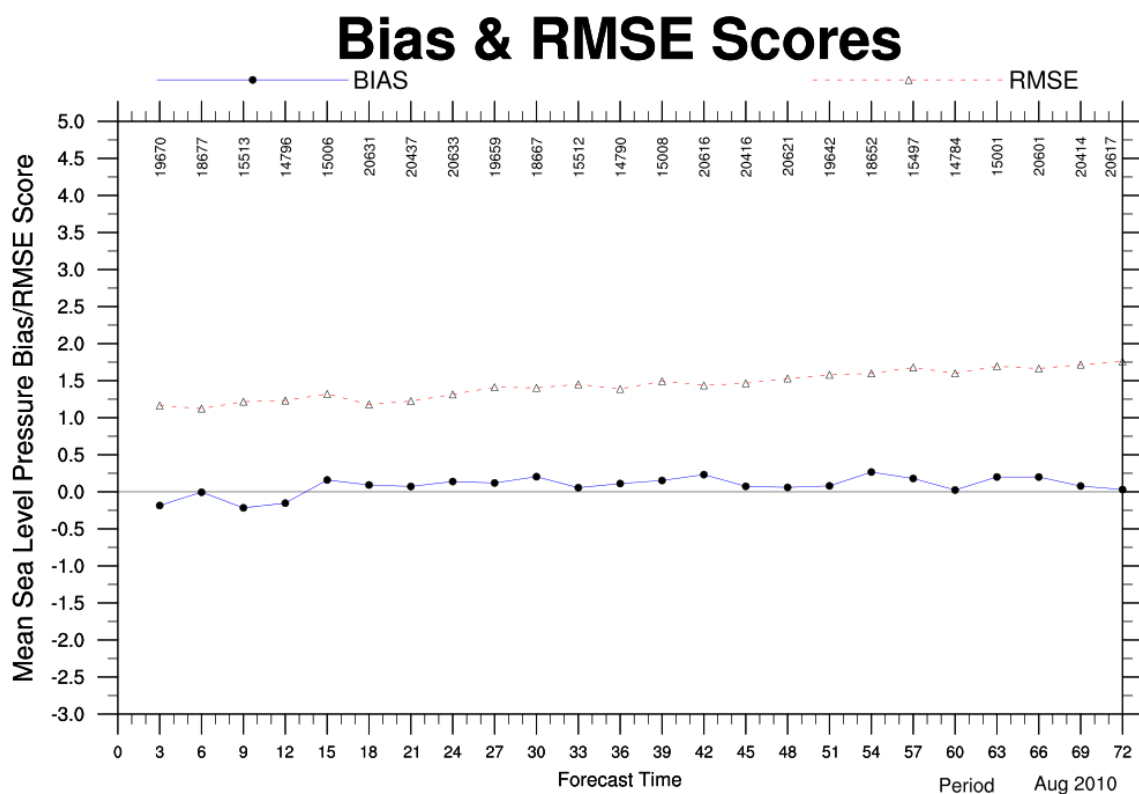
Η καλοκαιρινή περίοδος διαφέρει από τον υπόλοιπο χρόνο, αφού το bias παρουσιάζεται σχεδόν μηδενικό. Στα Σχήματα 4.3 και 4.4 απεικονίζονται τα αποτελέσματα για τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο 2010, οι οποίοι παρουσιάζουν μια διαφορετική εικόνα από αυτή όλου του χρόνου. Στο Σχήμα 4.3, το οποίο αναφέρεται στο μήνα Ιούλιο, το RMSE φαίνεται να έχει διακυμάνσεις σε σχέση με τον προγνωστικό χρόνο αλλά η συνολική του εικόνα μοιάζει να είναι αυξητική. Μεγάλο ενδιαφέρον έχει το bias το οποίο τις πρώτες πρωινές ώρες και τις μεσημεριανές είναι σχεδόν μηδέν. Επίσης σημαντικό είναι και το γεγονός ότι τις απογευματινές ώρες παρουσιάζει υπερεκτίμηση που φτάνει το 0.25 hPa.



Σχήμα 4.3: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της ατμοσφαιρικής πίεσης στη ΜΣΘ, Ιούλιος 2010. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Η εικόνα για τον μήνα Αύγουστο, που φαίνεται στο Σχήμα 4.4, είναι σχετικά διαφορετική. Το σφάλμα εδώ παρουσιάζει μικρότερη αυξητική πορεία σε σχέση με τον προγνωστικό χρόνο και αυτό πιθανόν να οφείλεται στην μικρότερη εξάρτηση της ατμοσφαιρικής πίεσης από το χρόνο της πρόγνωσης. Το συστηματικό σφάλμα από την άλλη στο σύνολο της προγνωστικής περιόδου παρουσιάζει υπερεκτίμηση, που κινείται κοντά στην τιμή μηδέν, εκτός από τις πρώτες προγνωστικές ώρες όπου υπάρχει υποεκτίμηση από το μοντέλο που φτάνει τα 0,25 hPa. Επίσης εδώ η τιμή μηδέν δεν εμφανίζεται τόσο συχνά όσο το μήνα Ιούλιο. Και τους τρεις καλοκαιρινούς μήνες το bias έχει την ίδια συμπεριφορά ξεκινώντας με υποεκτίμηση το πρώτο τρίωρο έπειτα παίρνει την τιμή μηδέν και το επόμενο τρίωρο παρουσιάζει ξανά υποεκτίμηση και μπορεί να αποδοθεί στην ασάφεια των πρώτων ωρών της προσομοίωσης (spin up).

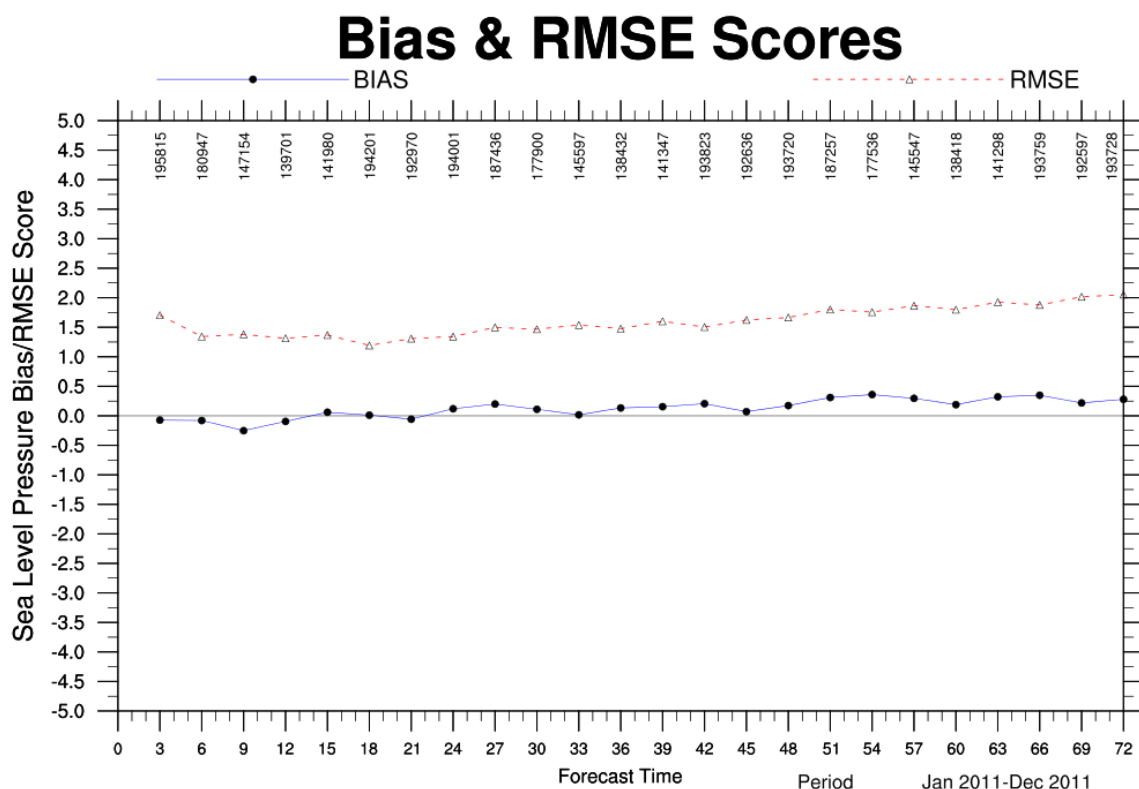


Σχήμα 4.4: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της ατμοσφαιρικής πίεσης στη ΜΣΘ, Αύγουστος 2010. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η ατμοσφαιρική πίεση ΜΣΘ για το έτος 2011. Παρατηρώντας στο διάγραμμα από το προγνωστικό σφάλμα φαίνεται η ατμοσφαιρική πίεση να έχει μικρότερη εξάρτηση από τον προγνωστικό χρόνο και να κινείται σταθερά από 1,25 έως 2,0 hPa. Το bias για το σύνολο του χρόνου παρουσιάζει υπερεκτίμηση που φτάνει μέχρι 1,0 hPa. Κατά τις μεσημεριανές ώρες όμως υπάρχει υποεκτίμηση της ατμοσφαιρικής πίεσης ΜΣΘ της τάξης των 0,25 hPa. Αξιοσημείωτο είναι ότι κατά τη διάρκεια της μέρας μεταξύ των πρωινών ωρών έξι και εννιά, αλλά και για τις βραδινές ώρες κοντά στις εννιά, το bias παίρνει την τιμή μηδέν. Σε αντίθεση με το 2010 όπου το bias παρουσιάζει συστηματική υποεκτίμηση και το προγνωστικό σφάλμα σταδιακή αύξηση με τον προγνωστικό χρόνο

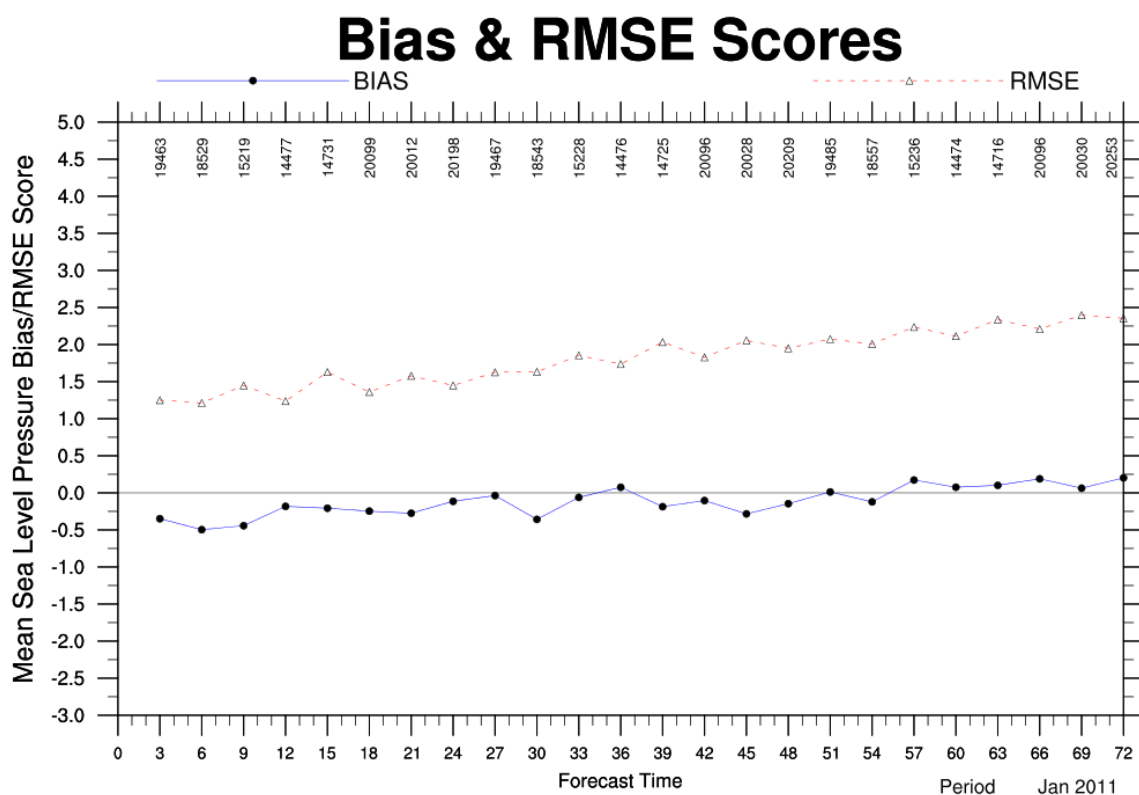
Το 2011 υπάρχουν αρκετές και έντονες διαφορές του RMSE και του bias για την ατμοσφαιρική πίεση, μεταξύ των εποχών του χρόνου, κυρίως τους μήνες Ιανουάριο, Απρίλιο, Ιούλιο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο.



Σχήμα 4.5: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της ατμοσφαιρικής πίεσης στη ΜΣΘ, για το έτος 2011. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

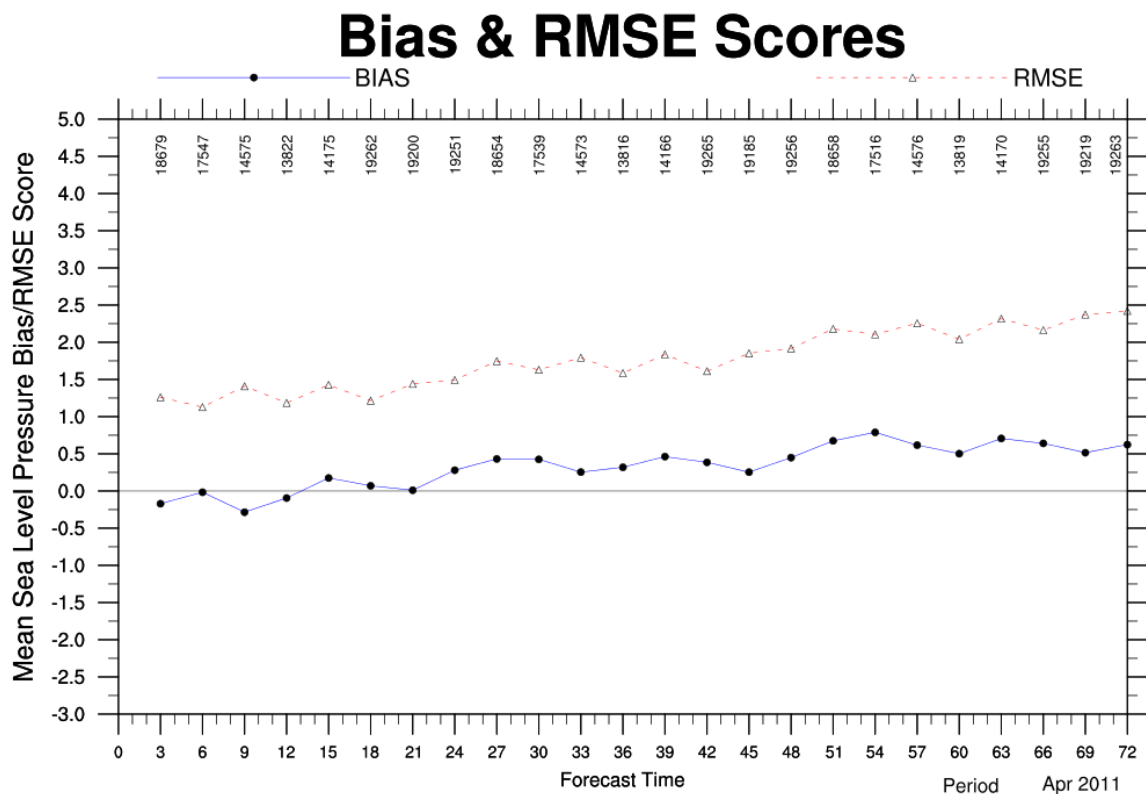
Τον μήνα Ιανουάριο υπάρχουν διαφορές και στο RMSE αλλά και στο bias. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.6, το σφάλμα παρουσιάζει εξάρτηση από τον προγνωστικό χρόνο έχοντας σταδιακή αύξηση και διακυμάνσεις από 0,25 hPa έως 2,25 hPa, λόγω των έντονων κινήσεων των ατμοσφαιρικών διαταραχών, κυρίως τις μεσημεριανές και τις πρώτες πρωινές ώρες. Το συστηματικό σφάλμα έχει μια εντελώς διαφορετική εικόνα σε σχέση με το σύνολο του έτους, αφού παρατηρείται περιορισμένη υποεκτίμηση μέχρι 0,5 hPa. Το τελευταίο δωδεκάωρο όμως παρουσιάζεται περιορισμένη υπερεκτίμηση μέχρι 0,5 hPa.



Σχήμα 4.6: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της ατμοσφαιρικής πίεσης στη ΜΣΘ, Ιανουάριος 2011. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

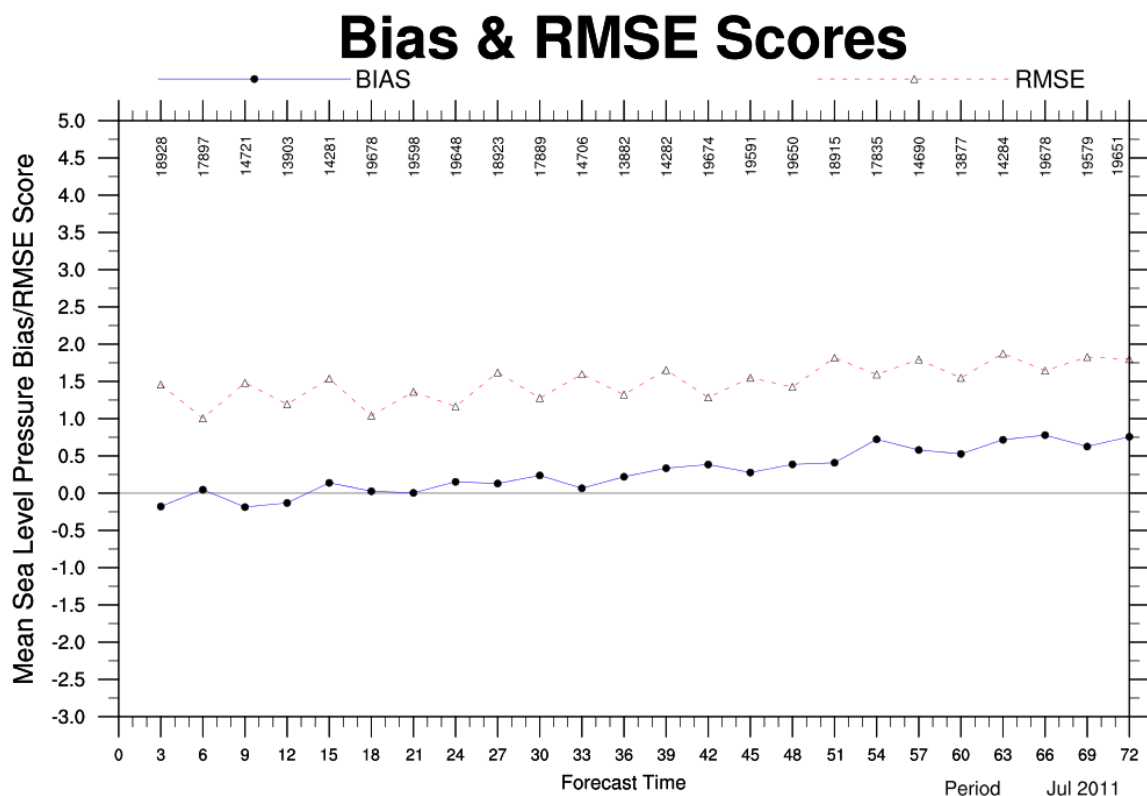
Συνεχίζοντας με το σφάλμα για τον μήνα Απρίλιο παρατηρείται η ίδια εικόνα με αυτή του Ιανουαρίου, δηλαδή η εξάρτηση της ατμοσφαιρικής πίεσης από τον προγνωστικό χρόνο παρουσιάζοντας μικρή σταδιακή αύξηση που φτάνει έως 2,5 hPa. Ο Απρίλιος παρουσιάζει την μεγαλύτερη υπερεκτίμηση στο bias, από τους υπόλοιπους μήνες του χρόνου. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.7, υπάρχει έντονη υπερεκτίμηση σε όλη τη διάρκεια του μήνα μέχρι 0,75 hPa, κατά τις μεσημεριανές ώρες. Επίσης παρατηρείται όπως και στο σύνολο του χρόνου τις πρώτες προγνωστικές ώρες το bias να παρουσιάζει υποεκτίμηση μέχρι 0,25 hPa.



Σχήμα 4.7: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της ατμοσφαιρικής πίεσης στη ΜΣΘ, Απρίλιος 2011. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

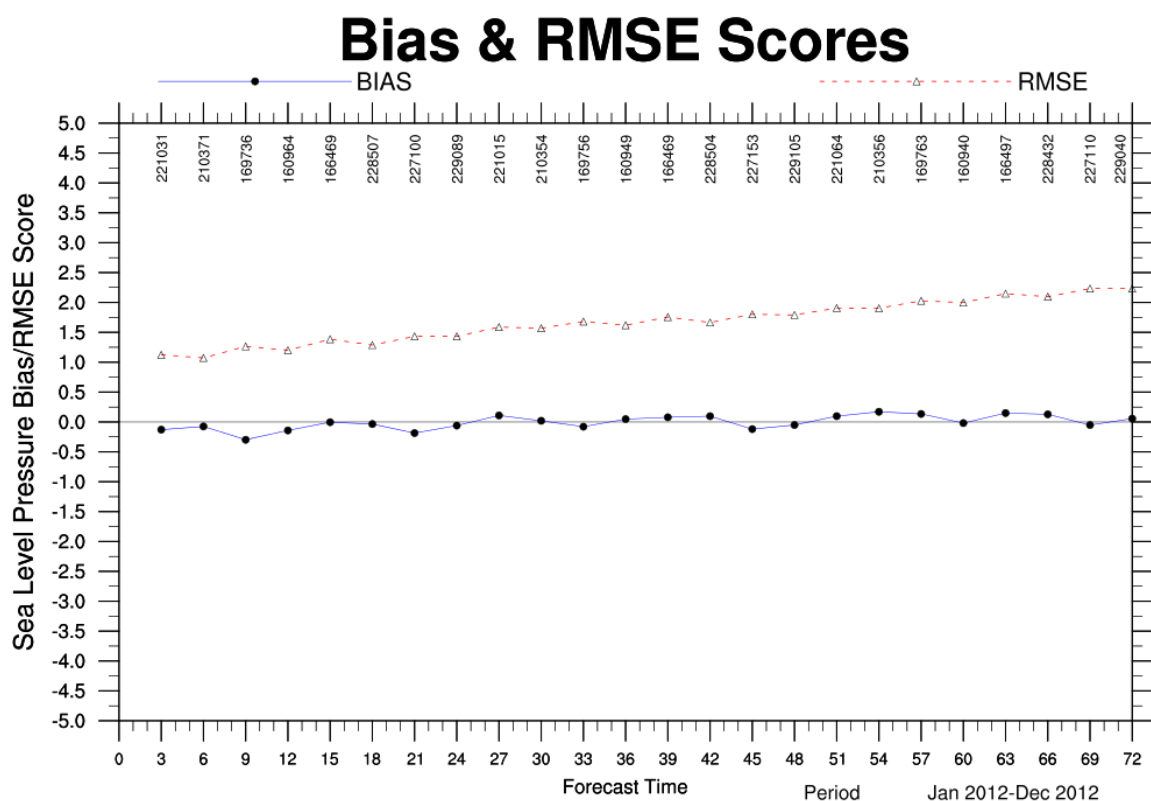
Αξίζει να σημειωθεί, ότι παρ' όλο που το καλοκαίρι του 2011 δεν φαίνεται να διαφέρει από την συνολική εικόνα του έτους, παρ' όλα αυτά το RMSE παρουσιάζεται λίγο διαφορετικό. Όπως δείχνει και το Σχήμα 4.8, το bias του μήνα Ιουλίου ακολουθεί την πορεία του bias για όλο το έτος 2011. Δηλαδή παρουσιάζει υπερεκτίμηση μέχρι 0,75 hPa, σε όλη την διάρκεια του μήνα, με περιορισμένη υποεκτίμηση τις μεσημεριανές ώρες, όπου στο διάστημα αυτό παίρνει και τη τιμή μηδέν. Αυτό που προκαλεί το ενδιαφέρον είναι η εικόνα της τετραγωνικής ρίζας του σφάλματος, από το οποίο φαίνεται η επιρροή της ατμοσφαιρικής πίεσης από τον προγνωστικό χρόνο, παρουσιάζοντας έντονες αυξομειώσεις που κυμαίνονται από 1,0 έως 2,0 hPa.



Σχήμα 4.8: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της ατμοσφαιρικής πίεσης στη ΜΣΘ, Ιούλιος 2011. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

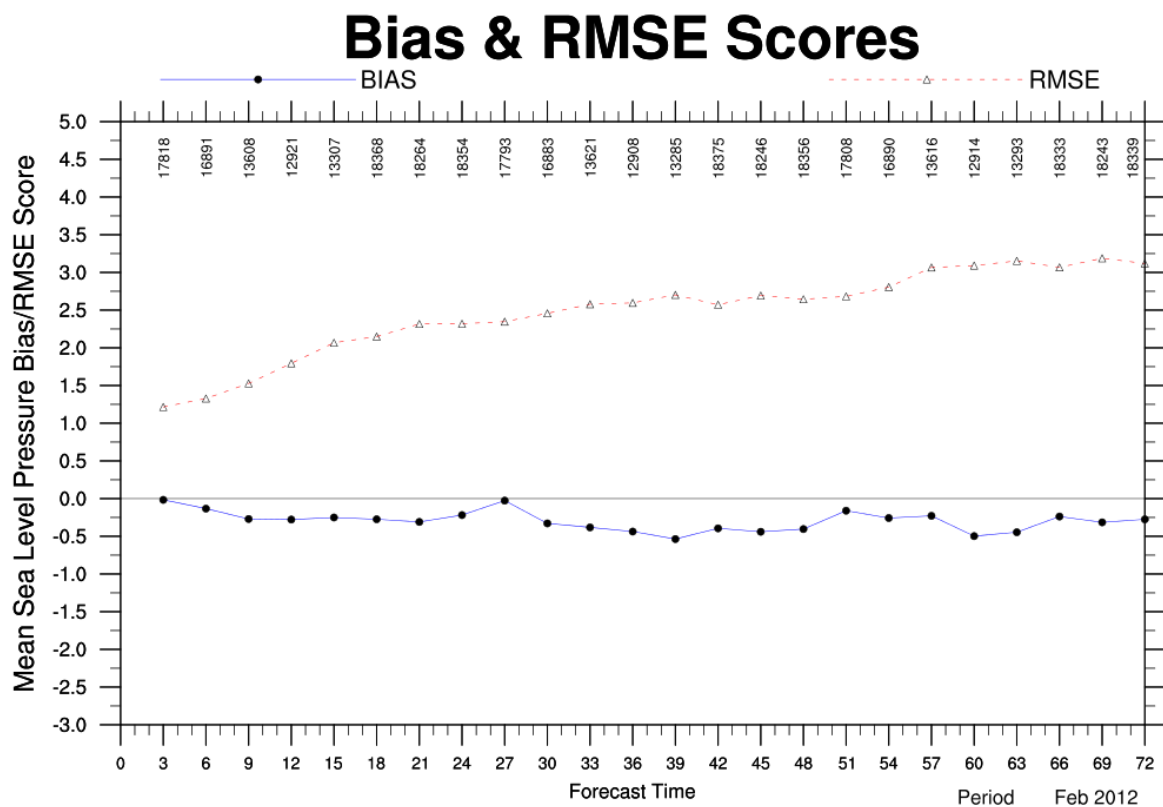
Στη συνέχεια παρουσιάζεται η ατμοσφαιρική πίεση ΜΣΘ την χρονική περίοδο 2012, όπου σε σύγκριση με το 2010 και το 2011, η εικόνα φαίνεται να έχει βελτιωθεί. Το σφάλμα, όπως δείχνει και το Σχήμα 2.9, παρουσιάζει την ατμοσφαιρική πίεση να εξαρτάται από τον προγνωστικό χρόνο, αφού ακολουθεί μια σταθερά αυξητική πορεία από 1,25 hPa έως 2.25 hPa. Το bias παρουσιάζει περιορισμένη υποεκτίμηση και υπερεκτίμηση την 9^η και την 54^η προγνωστική ώρα αντίστοιχα, μέχρι 0,25 hPa. Σε όλη την προγνωστική περίοδο το bias κινείται πολύ κοντά στην περιοχή της τιμής μηδέν και κάποιες φορές το συστηματικό σφάλμα είναι μηδέν.



Σχήμα 4.9: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών *RMSE* και *bias* της ατμοσφαιρικής πίεσης στη ΜΣΘ, για το έτος 2012. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

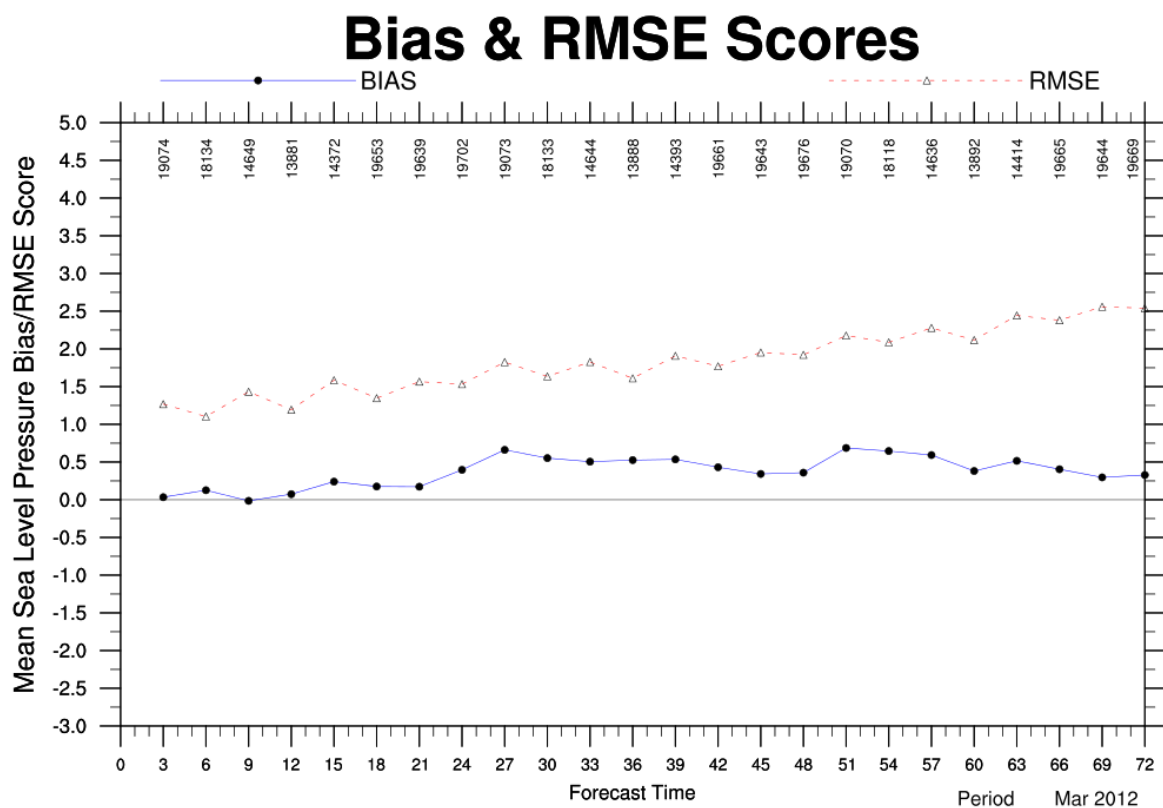
Οι μήνες του χειμώνα φαίνονται να διαφοροποιούνται από τη συνολική εικόνα του χρόνου, γιατί όπως έχει ήδη αναφερθεί η τετραγωνική ρίζα του σφάλματος το χειμώνα επηρεάζεται από την κινητικότητα των ατμοσφαιρικών διαταραχών. Παρ' όλο που τον Ιανουάριο το bias και το σφάλμα παρουσιάζουν την ίδια πορεία με το έτος, τους δυο επόμενους μήνες παρατηρείται υποεκτίμηση του bias και μια αρκετά έντονη εξάρτηση του σφάλματος από την πρόγνωση. Τον Φεβρουάριο όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.10, η ατμοσφαιρική πίεση, παρουσιάζει απότομη αύξηση του RMSE, από 1,25 hPa σε 3,25 hPa, δείχνοντας με αυτό τον τρόπο την ισχυρή εξάρτηση της πίεσης από τον προγνωστικό χρόνο. Το συστηματικό σφάλμα παρουσιάζει υποεκτίμηση μέχρι 0,5 hPa, που παρατηρείται τις βραδινές ώρες μεταξύ δώδεκα και τρεις τα ξημερώματα.



Σχήμα 4.10: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της ατμοσφαιρικής πίεσης στη ΜΣΘ, Φεβρουάριος 2012. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

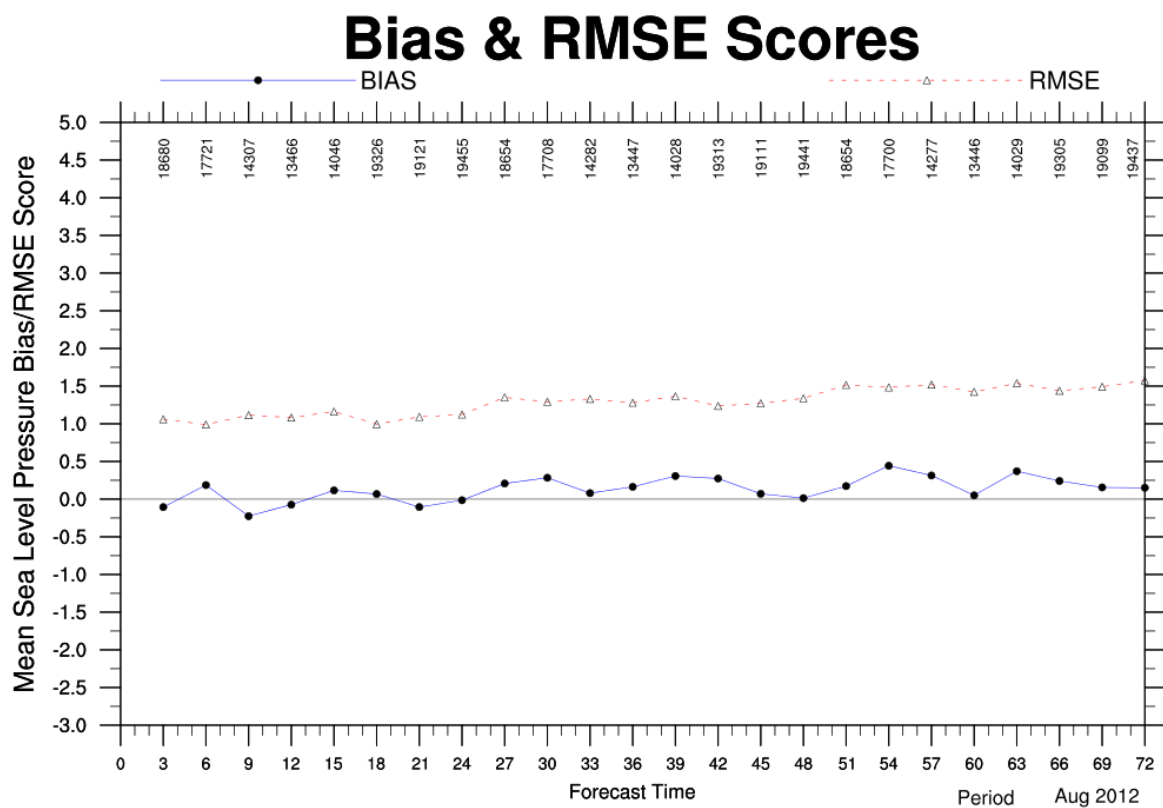
Τον Μάρτιο, το bias παρουσιάζει συστηματική υπερεκτίμηση για όλη τη διάρκεια της προγνωστικής περιόδου. Η υπερεκτίμηση φτάνει μέχρι 0,75 hPa κυρίως τις μεσημεριανές ώρες, σύμφωνα με το γράφημα στο Σχήμα 4.11. Επίσης τις πρώτες προγνωστικές ώρες το bias κινείται κοντά στην τιμή μηδέν. Η άνοιξη είναι η εποχή όπου φαίνεται πιο καθαρά η εξάρτηση της ατμοσφαιρικής πίεσης από τον προγνωστικό χρόνο, αφού το RMSE παρουσιάζει σταδιακή αύξηση από 1,0 hPa έως 2,5 hPa με έντονες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του μήνα.



Σχήμα 4.11: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της ατμοσφαιρικής πίεσης στη ΜΣΘ, Μάρτιος 2012. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

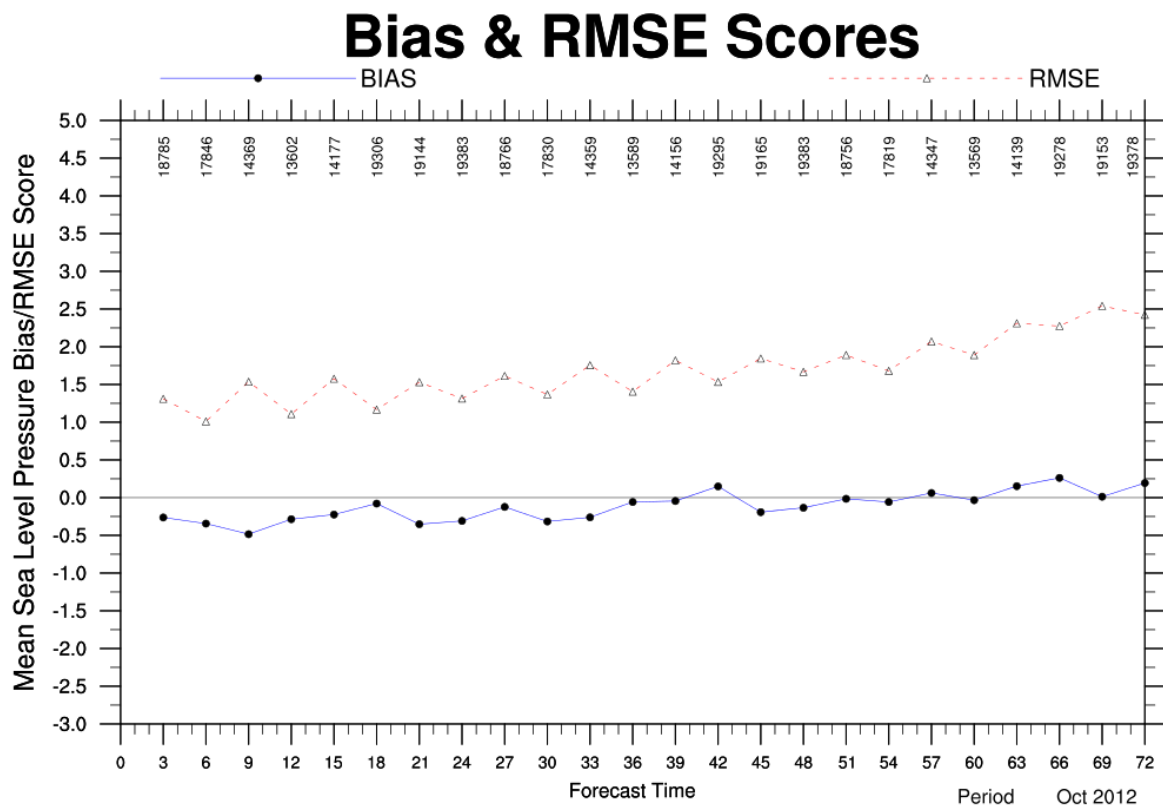
Σε αντίθεση με την άνοιξη, το καλοκαίρι το bias παρουσιάζει μια σταθερή υπερεκτίμηση, μετά το πρώτο 24ωρο μέχρι 0,75 hPa. Είναι μια εικόνα που διαφέρει αρκετά από το σύνολο του έτους, αφού και η εξάρτηση της πίεσης από τον προγνωστικό χρόνο είναι πολύ μικρή. Ο μήνας Αύγουστος παρουσιάζει πιο περιορισμένη υπερεκτίμηση του bias σε σχέση με τους άλλους δύο μήνες, αλλά είναι και ο μήνας στον οποίο γίνεται περισσότερο αισθητή η ανεξαρτησία του σφάλματος από τον προγνωστικό χρόνο, όπως πολύ καλά φαίνεται στο Σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.12: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της ατμοσφαιρικής πίεσης στη ΜΣΘ, 2012. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Τέλος το φθινόπωρο παρουσιάζει μια γενική υποεκτίμηση του συστηματικού σφάλματος εκτός από το μήνα Οκτώβριο όπου τις πρωινές ώρες παρουσιάζει περιορισμένη υπερεκτίμηση μέχρι 0,25 hPa. Ακόμη φαίνεται το διάστημα μεταξύ της 51^{ης} και 60^{ης} προγνωστικής ώρας το bias να παίρνει αρκετές φορές την τιμή μηδέν (Σχήμα 4.13). Σε ό, τι αφορά το προγνωστικό σφάλμα δεν έχει μια σταθερή αύξηση, αλλά παρατηρείται μια συνεχής διακύμανση με αυξομειώσεις από 1,0 hPa μέχρι 2,0 hPa για το πρώτο μισό της προγνωστικής περιόδου ενώ για το υπόλοιπο μισό παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση από 2,0 hPa έως 2,5 hPa.



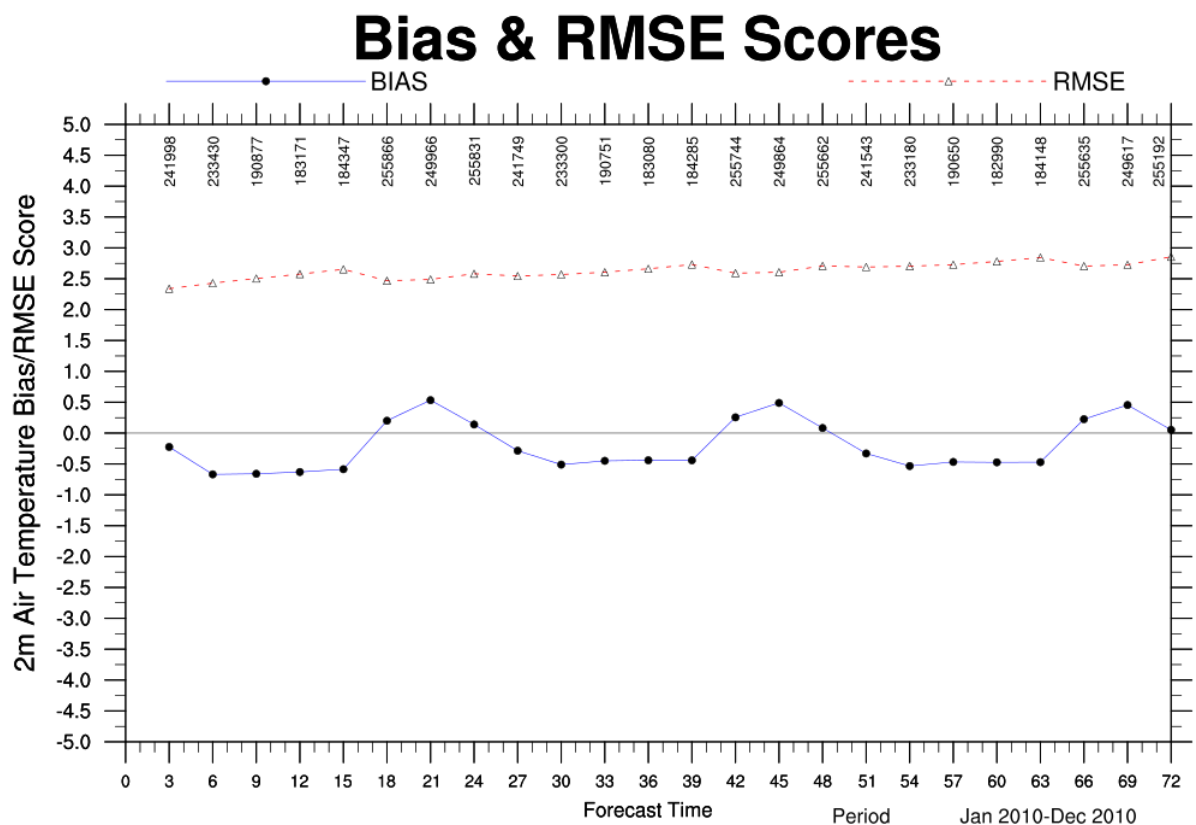
Σχήμα 4.13: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της ατμοσφαιρικής πίεσης στη ΜΣΘ, Οκτώβριος 2012. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

4.2 Θερμοκρασία του ανέμου στα 2m

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα γραφήματα από των υπολογισμό των δεικτών RMSE και bias για την θερμοκρασία του ανέμου στα 2 m για την περίοδο πρόγνωσης 2010-2012.

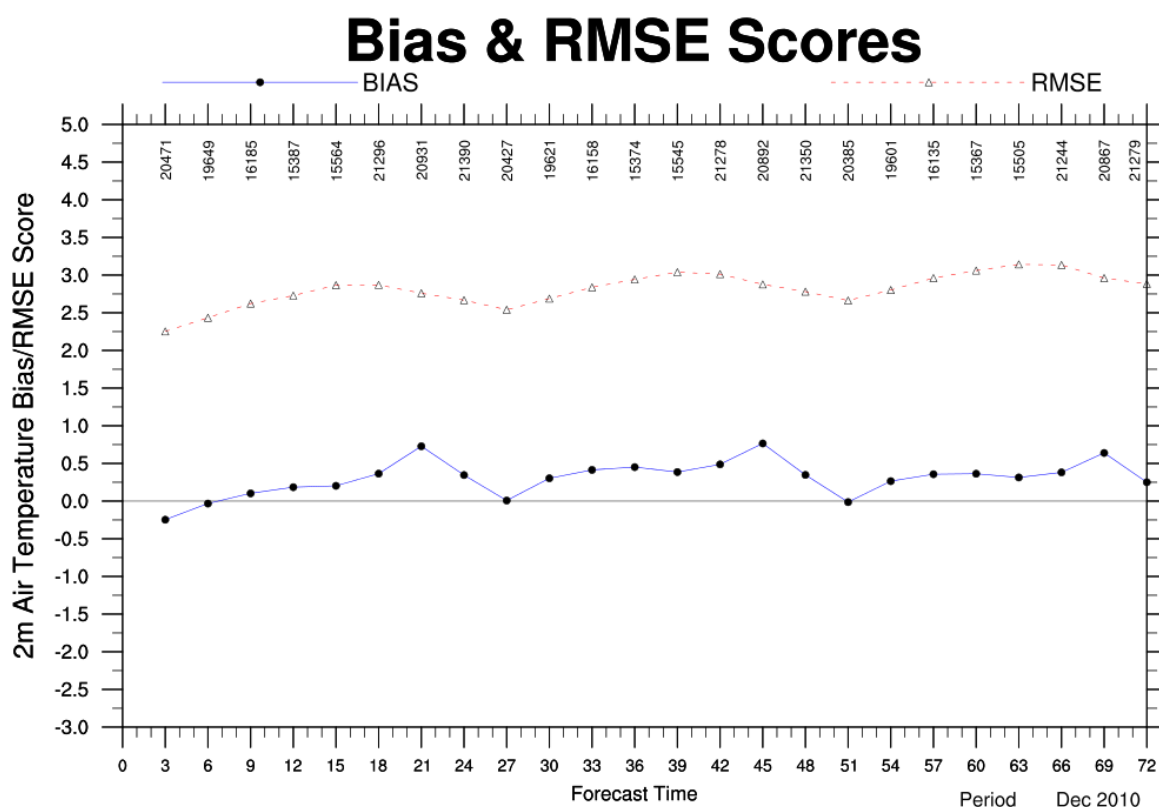
Το σφάλμα της θερμοκρασίας στα 2m, για το έτος 2010, δείχνει περιορισμένη εξάρτηση από τον προγνωστικό χρόνο όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.14 και κυμαίνεται σε εύρος από 2,0°C έως 2,5°C, για το σύνολο της προγνωστικής περιόδου. Το bias κατά τη διάρκεια της ημέρας εμφανίζει μια σταθερή περιοδικότητα, ανά δεκαπέντε ώρες, όπου τις νυχτερινές ώρες παρουσιάζει υποεκτίμηση ενώ τις πρωινές και τις μεσημεριανές υπερεκτίμηση. Αυτό μπορεί να οφείλεται και στην ελλιπή περιγραφή των επιφανειακών ροών ενέργειας, η οποία πιθανώς να προέρχεται από την αρχικοποίηση και τη λειτουργία του υπομοντέλου εδάφους (Κατσαφάδος κ.α., 2012).



Σχήμα 4.14.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της θερμοκρασίας του ανέμου στα 2m, για το έτος 2010. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.
Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Οι περισσότεροι μήνες δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές από την συνολική εικόνα του έτους. Το bias εμφανίζει σταθερή περιοδικότητα κατά την διάρκεια της προγνωστικής περιόδου κάθε μήνα. Επίσης υπάρχουν και μήνες όπου το σφάλμα φανερώνει κάποια εξάρτηση της θερμοκρασίας από την προγνωστικότητα.

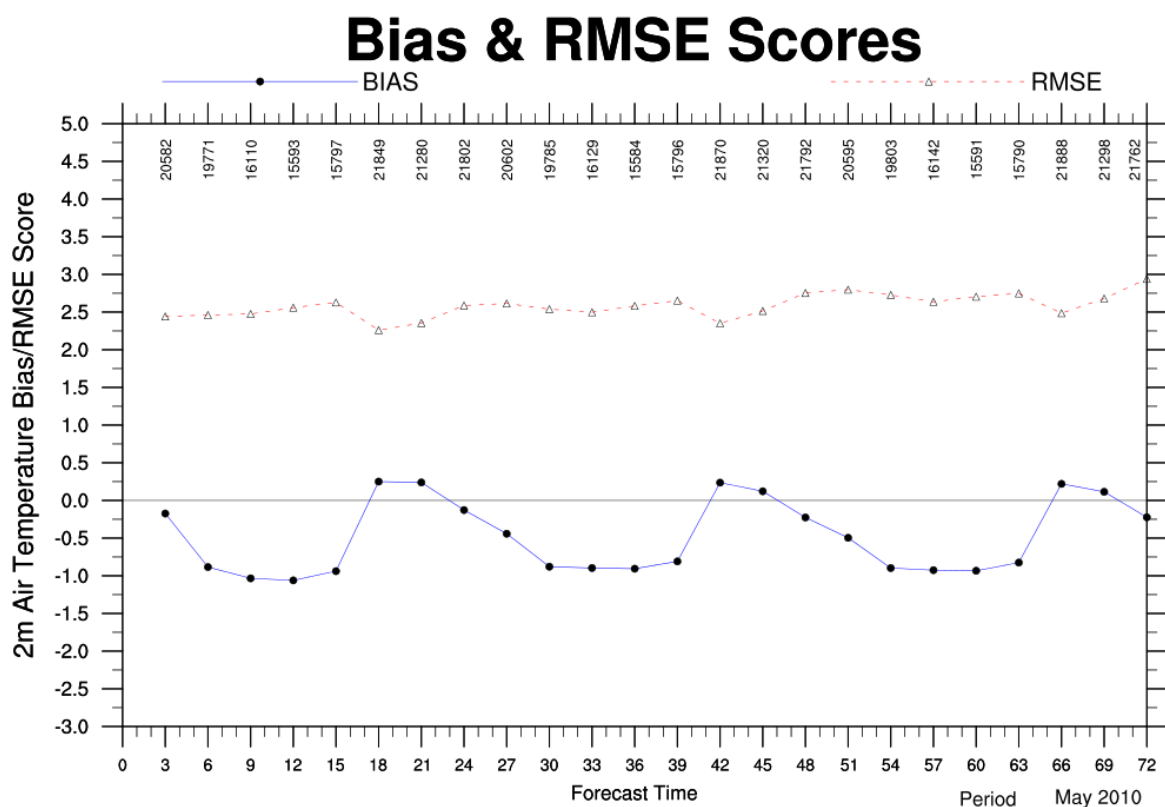
Το χειμώνα τους δυο από τους τρεις μήνες, το bias παρουσιάζει υπερεκτίμηση. Ένα παράδειγμα είναι και ο Δεκέμβριος που φαίνεται και στο Σχήμα 4.15, το προγνωστικό σφάλμα παρουσιάζει περιοδική εξάρτηση της θερμοκρασίας με τον προγνωστικό χρόνο, από $2,25^{\circ}\text{C}$ έως $3,25^{\circ}\text{C}$. Το συστηματικό σφάλμα εμφανίζει σταθερή υπερεκτίμηση που φτάνει μέχρι $0,75^{\circ}\text{C}$ κυρίως τις πρωινές ώρες, ενώ τις μεσημεριανές φαίνεται να παίρνει την τιμή μηδέν. Η συγκεκριμένη προγνωστική συμπεριφορά φαίνεται να προέρχεται από εσφαλμένη περιγραφή των επιφανειακών ροών από το μοντέλο.



Σχήμα 4.15.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της θερμοκρασίας του ανέμου στα 2m, Δεκέμβριος 2010. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Για τους μήνες της άνοιξης εμφανίζεται σημαντική ημερήσια περιοδικότητα του συστηματικού σφάλματος. Η τετραγωνική ρίζα του σφάλματος παρουσιάζει μεγαλύτερη εξάρτηση της θερμοκρασίας από την περίοδο της πρόγνωσης, ενώ το συστηματικό σφάλμα ακολουθεί την πορεία που φάνηκε και πιο πάνω για όλο το έτος, παρουσιάζοντας και εδώ υποεκτίμηση που ίσως να οφείλονται σε πιθανή έλλειψη υγρασίας του εδάφους, διατηρώντας την περιοδικότητα του. Στο Σχήμα 4.16 φαίνεται το σφάλμα και το bias για τον μήνα Μάιο. Τον μήνα αυτό παρατηρώντας το σφάλμα διαπιστώνεται ότι η εξάρτηση της θερμοκρασίας από την πρόγνωση είναι πιο έντονη, με απότομη μείωση τις πρώτες πρωινές ώρες. Το bias εμφανίζει μια σταθερή περιοδικότητα με υπερεκτίμηση τις πρωινές ώρες που φτάνει μέχρι $0,25^{\circ}\text{C}$ και υποεκτίμηση τον υπόλοιπο προγνωστικό χρόνο που κυμαίνεται από $0,25^{\circ}\text{C}$ έως $1,0^{\circ}\text{C}$.

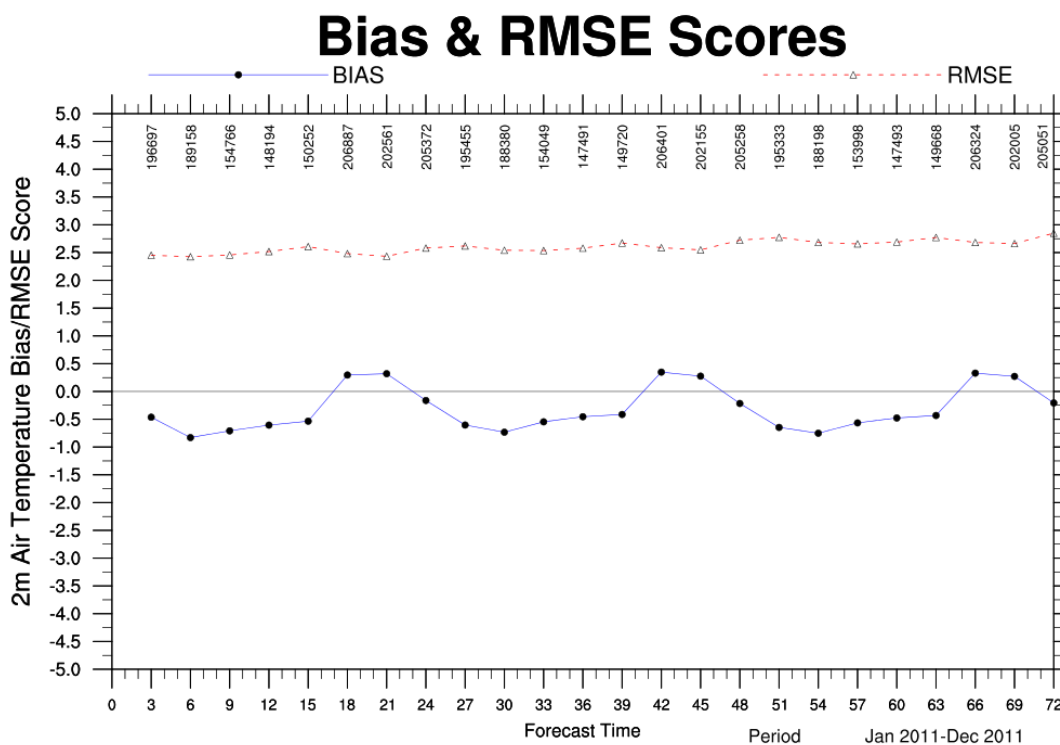


Σχήμα 4.16.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της θερμοκρασίας του ανέμου στα 2m, Μάιος 2010. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Το καλοκαίρι δεν παρουσιάζει κάποια σημαντική διαφορά από αυτή που αναφέρθηκε και παραπάνω για την περίοδο της άνοιξης, μιας και το καλοκαίρι είναι η περίοδος της μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας και χαρακτηρίζεται από έλλειψη υγρασίας του εδάφους. Και εδώ το σφάλμα υποδηλώνει μια μικρή εξάρτηση της θερμοκρασίας από την προγνωστικότητα, ενώ το bias παρουσιάζει σταθερή περιοδικότητα, όπου τις νυχτερινές ώρες υπάρχει υποεκτίμηση ενώ τις πρωινές ώρες υπερεκτίμηση.

Περνώντας στο έτος 2011 παρατηρείται ότι οι δείκτες RMSE και bias έχουν παρόμοια συμπεριφορά με αυτή που παρουσιάστηκε τον προηγούμενο χρόνο (Σχήμα 4.17). Το σφάλμα φαίνεται να μην παρουσιάζει κάποια εξάρτηση της θερμοκρασίας από το χρόνο πρόγνωσης, αφού κυμαίνεται σε ένα εύρος από 2,0°C έως 2,25°C. Το bias κατά τη διάρκεια όλης της προγνωστικής περιόδου εξακολουθεί να παρουσιάζει περιοδική υποεκτίμηση τις νυχτερινές ώρες, που φτάνει μέχρι 0,75°C και υπερεκτίμηση, έως 0,5°C, τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες. Δηλαδή αποτυπώνει ένα μεγαλύτερο ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος σε σχέση με την πραγματικότητα.

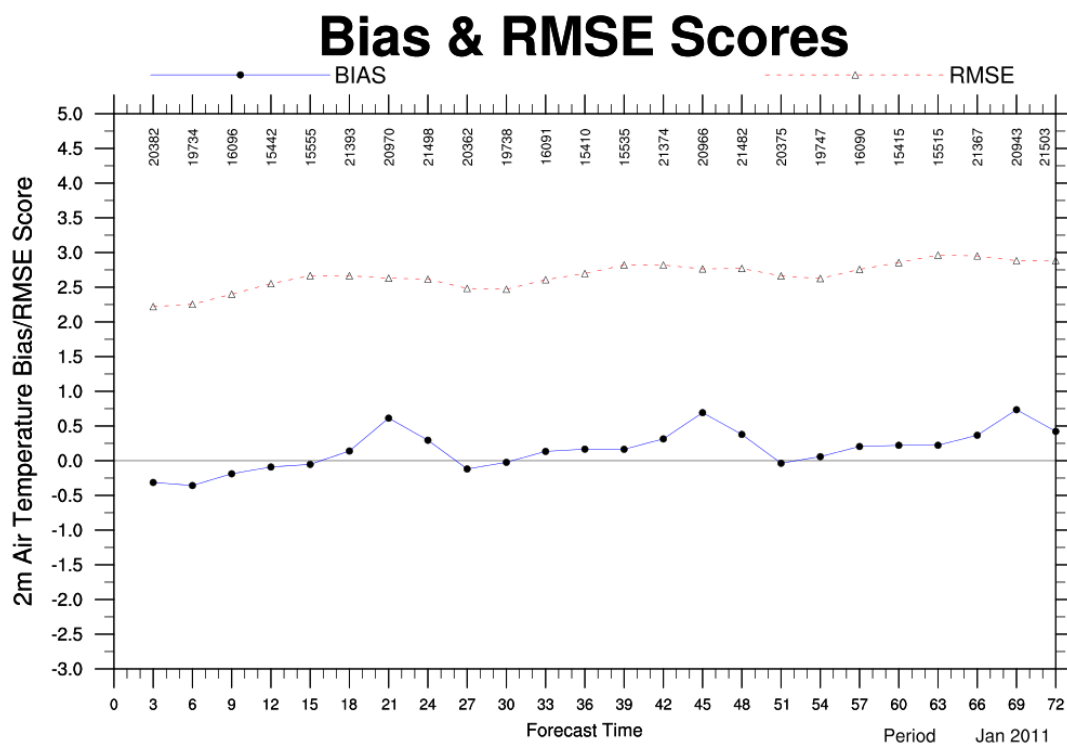


Σχήμα 4.17.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της θερμοκρασίας του ανέμου στα 2m, για το έτος 2011. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Παρατηρώντας την κάθε εποχή ξεχωριστά και έπειτα τον κάθε μήνα μόνο του, φαίνεται να υπάρχουν κάποιες μικρές διαφορές, σε ό, τι αφορά την πορεία των μεγεθών του σφάλματος και του bias σε σχέση με τον προγνωστικό χρόνο.

Ξεκινώντας από τον χειμώνα αξίζει να αναφερθούν τα αποτελέσματα για τον Ιανουάριο. Απ' ό,τι φαίνεται και στο γράφημα, στο Σχήμα 4.18, το προγνωστικό σφάλμα εμφανίζει μικρή εξάρτηση της θερμοκρασίας από την περίοδο πρόγνωσης και κινείται στο διάστημα μεταξύ 2,25°C και 3,0°C. Ακόμη στο παρακάτω γράφημα το συστηματικό σφάλμα παρουσιάζει κυρίως περιορισμένη υπερεκτίμηση, για το μεγαλύτερο μέρος της προγνωστικής περιόδου, μέχρι 0,75°C. Φυσικά παρατηρείται και υποεκτίμηση τις μεσημεριανές ώρες έως 0,5°C.

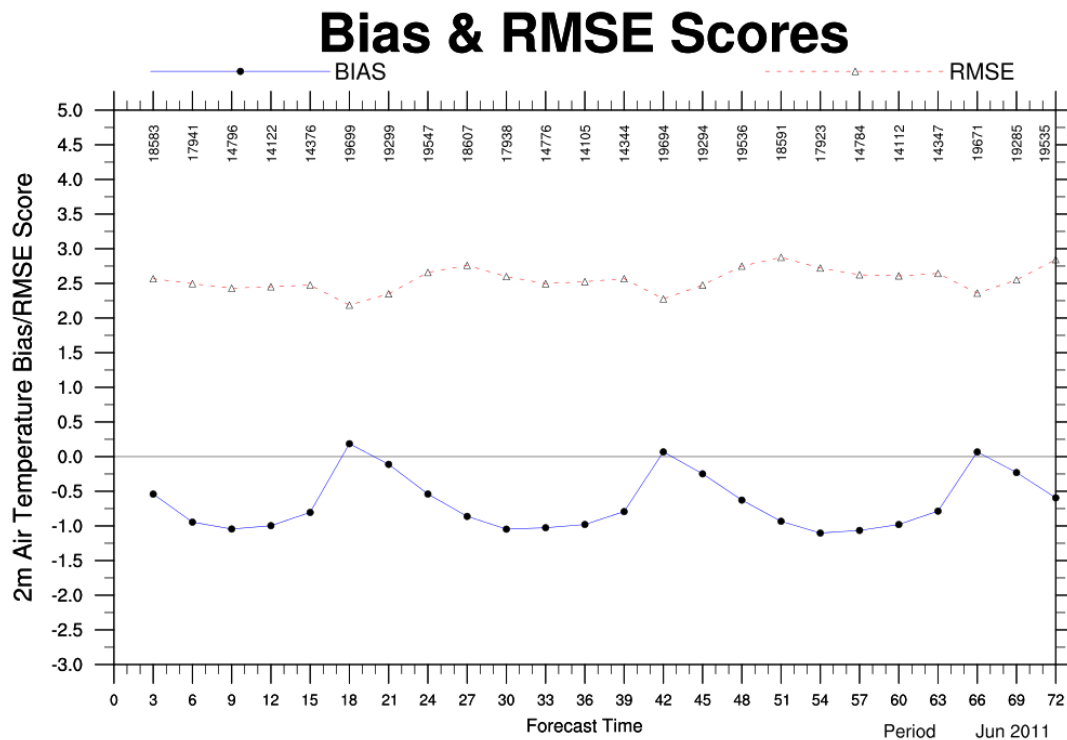


Σχήμα 4.18.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της θερμοκρασίας του ανέμου στα 2m, Ιανουάριος 2011. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

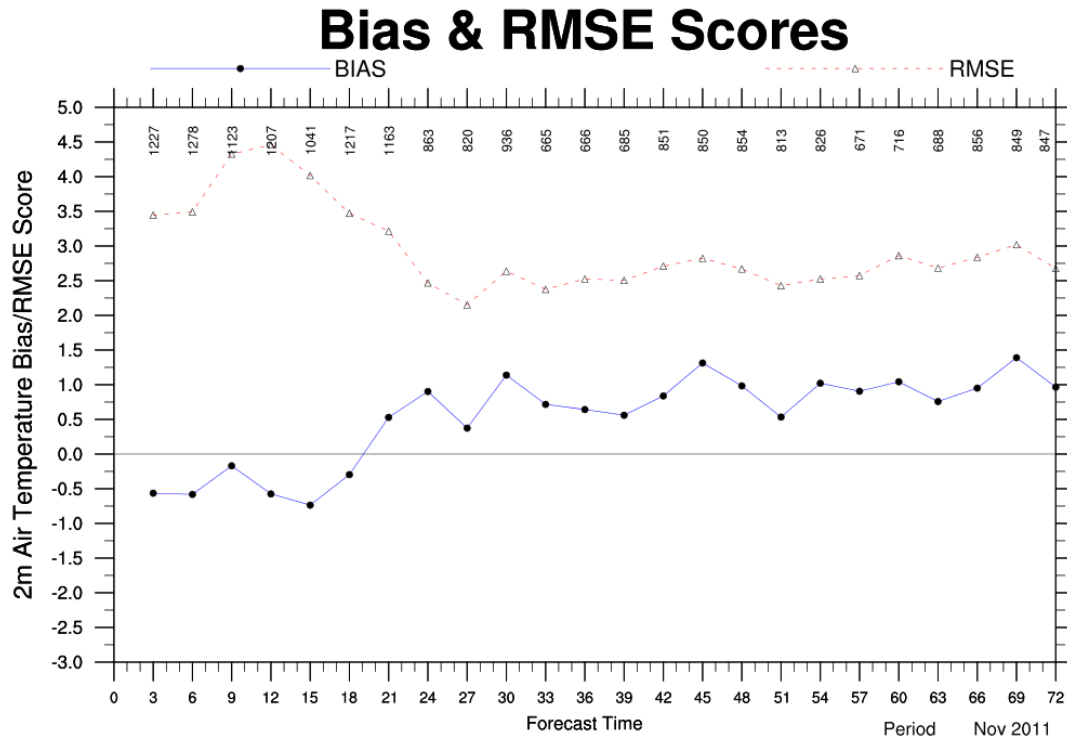
Η άνοιξη δεν παρουσιάζει κάποια σημαντική διαφορά στην εικόνα των στατιστικών μεγεθών του RMSE και του bias, από αυτή που παρουσιάζει όλο το έτος. Η πορεία του RMSE με τον προγνωστικό χρόνο αποδεικνύει μια μικρή εξάρτηση της θερμοκρασίας, ενώ το bias παρουσιάζει περιοδική υποεκτίμηση τις νυχτερινές ώρες, έως $1,25^{\circ}\text{C}$, ενώ τις πρωινές ώρες περιοδική υπερεκτίμηση μέχρι $0,5^{\circ}\text{C}$.

Από την καλοκαιρινή περίοδο του χρόνου ο μήνας που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι ο Ιούνιος. Το σφάλμα, όπως δείχνει και το *Σχήμα 4.19*, υποδεικνύει εξάρτηση της θερμοκρασίας με την προγνωστικότητα και αυτό φαίνεται από τις έντονες διακυμάνσεις του RMSE με εύρος από $2,25^{\circ}\text{C}$ μέχρι $3,0^{\circ}\text{C}$. Εντύπωση δημιουργεί, όπως και το προηγούμενο καλοκαίρι το bias το οποίο εμφανίζει συστηματική υποεκτίμηση για ολόκληρο τον προγνωστικό χρόνο που φτάνει μέχρι $1,0^{\circ}\text{C}$, με εξαίρεση κάποιες λίγες πρωινές ώρες που εμφανίζει πολύ περιορισμένη υπερεκτίμηση που κινείται κοντά στο μηδέν. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά μπορεί να αποδοθεί στην λειτουργία του σχήματος ακτινοβολίας του μοντέλου κατά περίοδο μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και στην εκτίμηση μειωμένης, σε σχέση με την πραγματικότητα.



Σχήμα 4.19.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της θερμοκρασίας του ανέμου στα 2m, Ιούνιος 2011. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.
Πηγή: Ιδία επεξεργασία

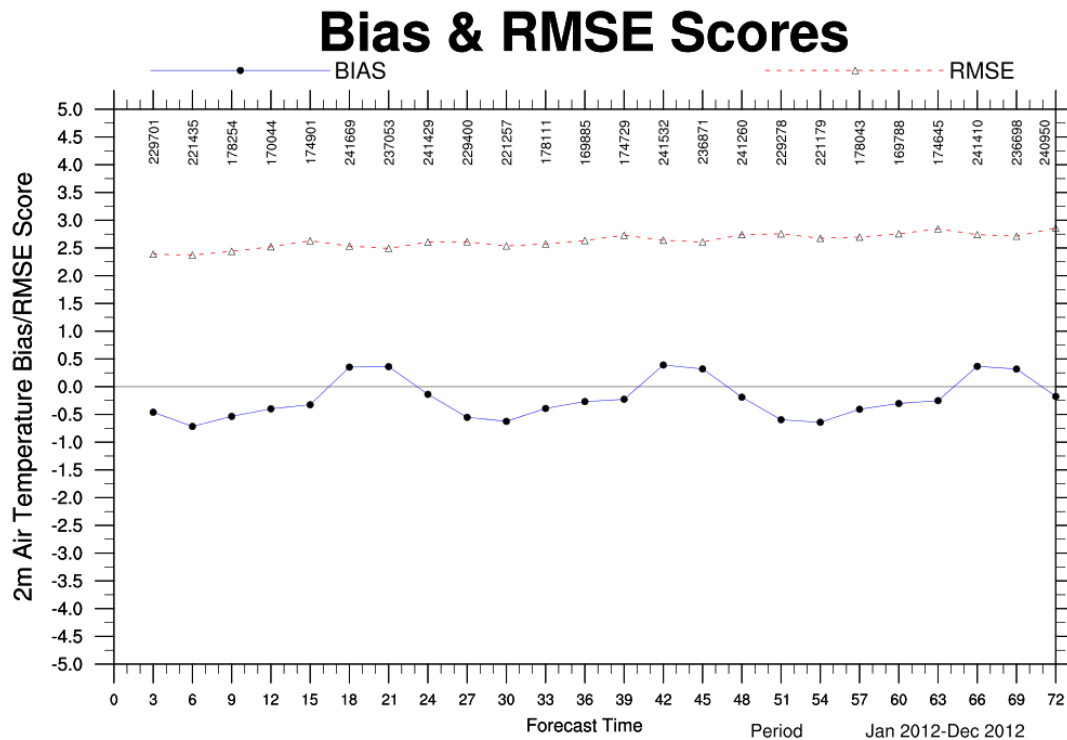
Ο Νοέμβριος είναι ο μήνας που αξίζει να παρουσιαστεί, αφού η εικόνα των αποτελεσμάτων του διαφέρει, όχι μόνο από τους μήνες του φθινοπώρου, αλλά και από ολόκληρο το χρόνο. Σύμφωνα με το Σχήμα 4.20, η τετραγωνική ρίζα του σφάλματος παρουσιάζει ισχυρή εξάρτηση της θερμοκρασίας με τον προγνωστικό χρόνο. Το RMSE τις πρώτες προγνωστικές ώρες κυμαίνεται από 3,5°C έως 4,5°C. Από την 24^η ώρα και μετά πέφτει από 2,0°C μέχρι 3,0°C. Η πορεία του σφάλματος που παρουσιάστηκε πιο πάνω, συνδυάζεται με την υποεκτίμηση που εμφανίζει το συστηματικό σφάλμα το πρώτο δωδεκάωρο που φτάνει έως 0,75°C και από την υπερεκτίμηση που εμφανίζεται για την υπόλοιπη προγνωστική περίοδο σε εύρος από 0,25°C μέχρι 1,25°C. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη μεγάλη διαφορά των τιμών μεταξύ των ζευγών παρατήρησης και πρόγνωσης. προερχόμενα από περιοχές με έντονο ανάγλυφο που δεν αναλύονται επαρκώς από την οριζόντια διακριτοποίηση του μοντέλου.



Σχήμα 4.20.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών *RMSE* και *bias* της θερμοκρασίας του ανέμου στα 2m, Νοέμβριος 2011. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Για τον τρίτο χρόνο πρόγνωσης, δηλαδή το 2012, τα στατιστικά μεγέθη του σφάλματος και του *bias* για τη θερμοκρασία του ανέμου στα 2m, παρουσιάζουν την ίδια εικόνα με τα δυο προηγούμενα χρόνια. Όπως φαίνεται και το Σχήμα 4.21, το προγνωστικό σφάλμα δείχνει να μην υπάρχει εξάρτηση της θερμοκρασίας από την περίοδο πρόγνωσης και κινείται σε ένα εύρος από 2,5°C έως 2,75°C. Από την άλλη μεριά το *bias* εξακολουθεί να παρουσιάζει την περιοδικότητα που περιγράφηκε και παραπάνω, εμφανίζοντας υποεκτίμηση τις νυχτερινές ώρες, μέχρι 0,75°C και μικρότερη υπερεκτίμηση τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες έως 0,5°C.



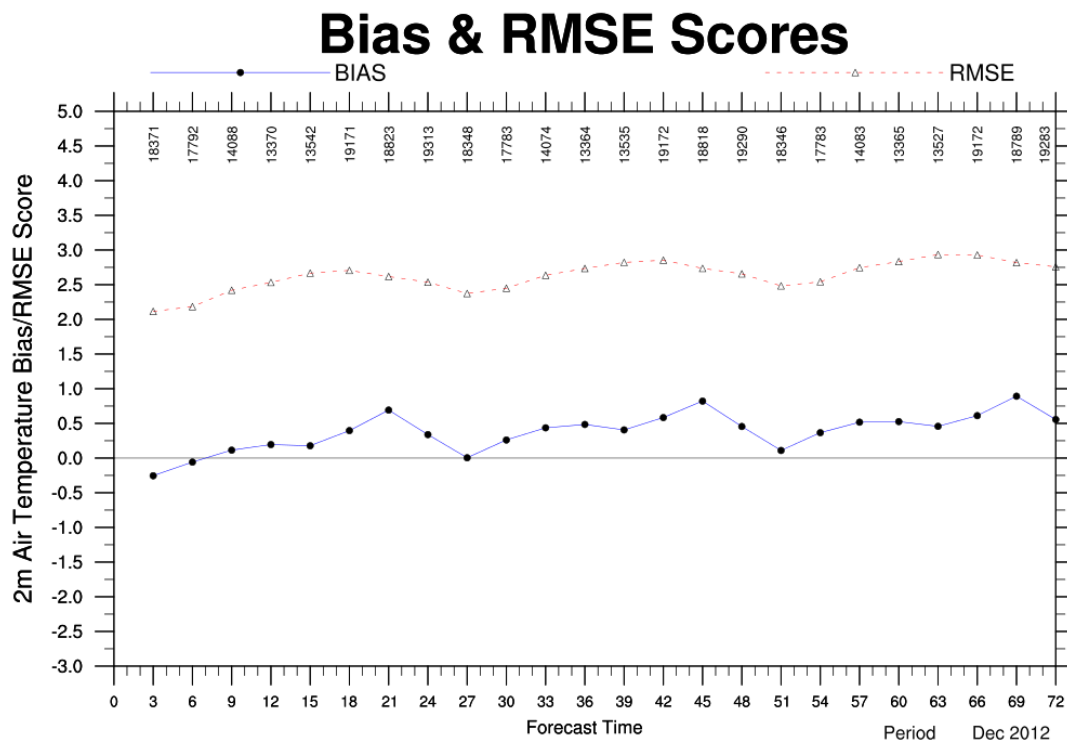
Σχήμα 4.21.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της θερμοκρασίας του ανέμου στα 2m, για το έτος 2012. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Παρατηρώντας τα στατιστικά μεγέθη για κάθε μήνα του 2012 ξεχωριστά, διαπιστώνεται πως στην πλειοψηφία τους δεν υπάρχουν διαφορές από την συνολική εικόνα του έτους. Το συστηματικό σφάλμα παρουσιάζει περιοδική υποεκτίμηση κατά τις νυχτερινές ώρες και υπερεκτίμηση τις πρωινές και μεσημεριανές. Το προγνωστικό σφάλμα, και εδώ όπως το 2010 και το 2011, κατά τη διάρκεια της προγνωστικής περιόδου παρουσιάζει περιορισμένη εξάρτηση της θερμοκρασίας σε σχέση με την προγνωστικότητα. Οι μήνες που αξίζει να σχολιαστούν είναι κατά τη διάρκεια του χειμώνα ο Δεκέμβριος και για το φθινόπωρο ο Οκτώβριος και ο Νοέμβριος.

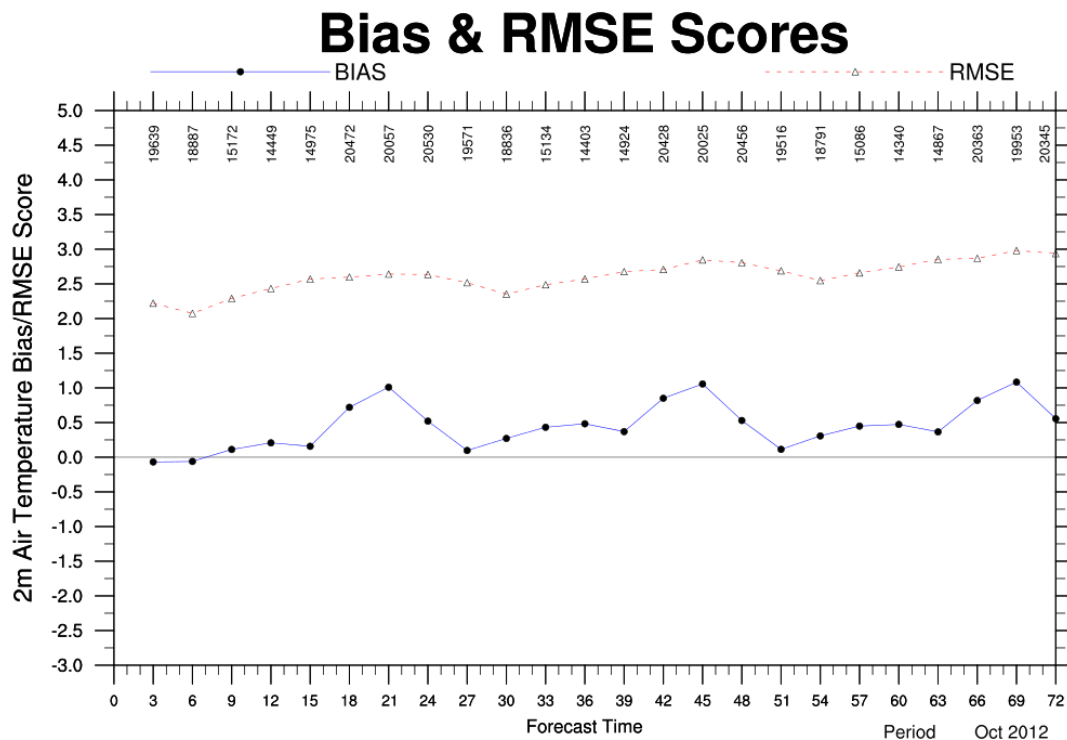
Όπως φαίνεται και από Σχήμα 4.22, για τον μήνα Δεκέμβριο το σφάλμα φαίνεται να κινείται περιοδικά παρουσιάζοντας εξάρτηση της θερμοκρασίας με την προγνωστικότητα, από 2,25°C έως 2,75°C. Το συστηματικό σφάλμα για το μεγαλύτερο μέρος της προγνωστικής περιόδου εμφανίζει υπερεκτίμηση με

τις μέγιστες τιμές να τις παίρνει τις πρωινές ώρες φτάνοντας μέχρι $1,0^{\circ}\text{C}$ και τις ελάχιστες τις μεσημεριανές πλησιάζοντας την τιμή μηδέν. Επίσης τις πρώτες προγνωστικές ώρες παρουσιάζει πολύ περιορισμένη υποεκτίμηση έως $0,25^{\circ}\text{C}$.



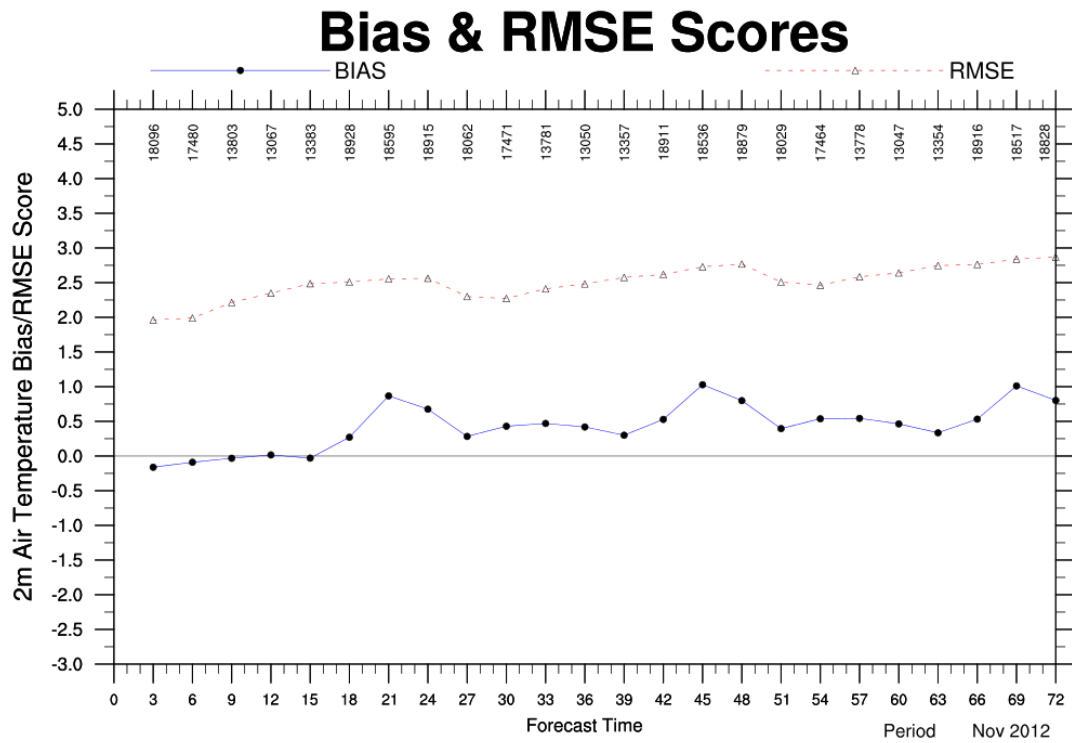
Σχήμα 4.22.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της θερμοκρασίας του ανέμου στα 2m, Δεκέμβριος 2012. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.
Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Στη συνέχεια στο Σχήμα 4.23 φαίνονται τα γραφήματα των στατιστικών μεγεθών για το μήνα Οκτώβριο. Το RMSE και εδώ φανερώνει εξάρτηση της θερμοκρασίας με την προγνωστικότητα και κυμαίνεται σε εύρος από $2,0^{\circ}\text{C}$ μέχρι $3,0^{\circ}\text{C}$. Τον συγκεκριμένο μήνα τα bias παρουσιάζει την μεγαλύτερη υπερεκτίμηση και άρα περισσότερη υγρασία στο έδαφος, διατηρώντας πάντα την περιοδικότητά του. Τις μέγιστες τιμές, που φτάνουν μέχρι $1,25^{\circ}\text{C}$, τις παίρνει κυρίως τις πρωινές ώρες, ενώ οι ελάχιστες, που πλησιάζουν το μηδέν, παρατηρούνται τις μεσημεριανές ώρες.



Σχήμα 4.23.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών *RMSE* και *bias* της θερμοκρασίας του ανέμου στα 2m, Οκτώβριος 2012. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.
Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Ο Νοέμβριος, που είναι και ο τελευταίος που θα σχολιαστεί για το 2012, δεν φαίνεται να παρουσιάζει κάτι διαφορετικό από τους δυο προηγούμενους μήνες (Σχήμα 4.24). Η εικόνα του σφάλματος δηλώνει και σε αυτή την περίπτωση την εξάρτηση της θερμοκρασίας από τον χρόνο, το εύρος που κυμαίνεται είναι μεγαλύτερο από 2,0°C μέχρι 3,0°C, όπως και τον Οκτώβριο, με την διαφορά ότι εδώ το *RMSE* παρουσιάζει απότομη πτώση όταν παίρνει την ελάχιστη τιμή. Συνδυάζεται επίσης και με μια περιοδική υπερεκτίμηση από το συστηματικό σφάλμα όπου η μέγιστη τιμή εμφανίζεται και εδώ τις πρωινές ώρες, ενώ η ελάχιστη τις μεσημεριανές .



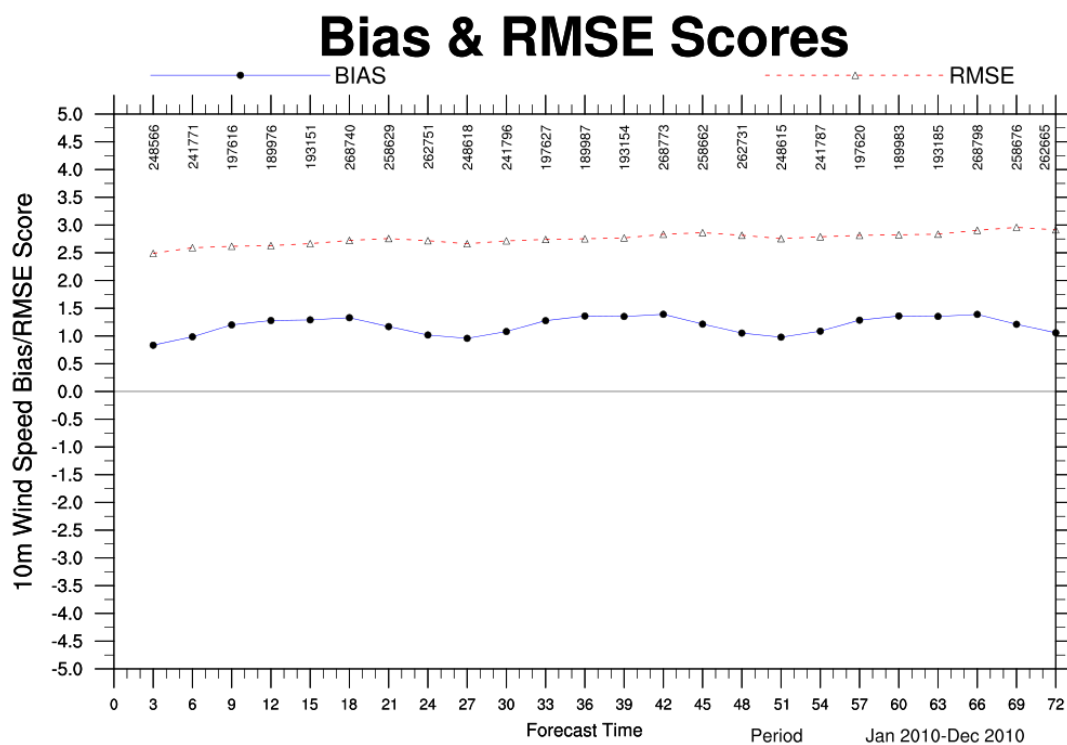
Σχήμα 4.24.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών *RMSE* και *bias* της θερμοκρασίας του ανέμου στα 2m, Νοέμβριος 2012. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

4.3 Ένταση του ανέμου στα 10m

Στην υποενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για την χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias για την ένταση του ανέμου στα 10m.

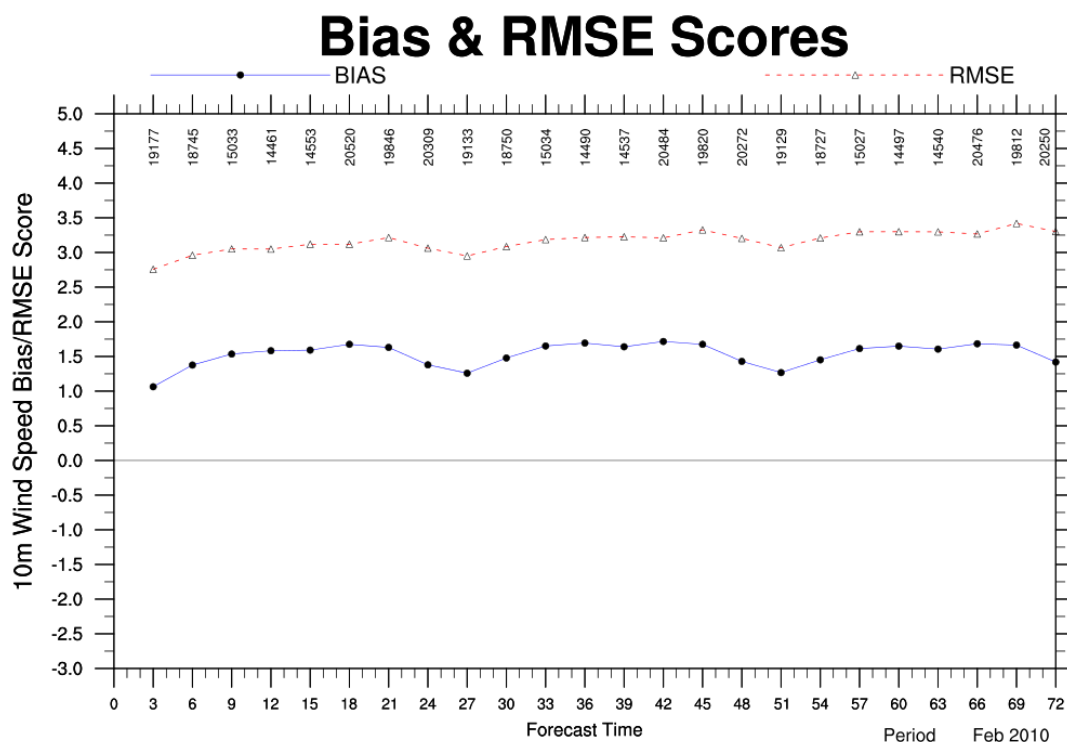
Ξεκινώντας από το 2010 και παρατηρώντας το Σχήμα 4.25, εντοπίζεται μια συστηματική υπερεκτίμηση του bias που κυμαίνεται από $0,75 \text{ ms}^{-1}$ τις μεσημεριανές ώρες μέχρι $1,5 \text{ ms}^{-1}$ τις πρωινές. Σύμφωνα με τους Roux et al. (2009) τα μέγιστα του προγνωστικού σφάλματος του ανέμου εντοπίζονται σε υψόμετρα από 700-1500m καθώς και σε παράκτιες περιοχές όπως δείχνουν και τα αποτελέσματα από ανάλογες εργασίες. Η τετραγωνική ρίζα του σφάλματος δείχνει αμελητέα εξάρτηση της έντασης του ανέμου από τον χρόνο αφού η διαφορά δεν ξεπερνάει τα $0,25 \text{ ms}^{-1}$.



Σχήμα 4.25.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της έντασης του ανέμου στα 10m, για το έτος 2010. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Κατά τους χειμερινούς μήνες η ένταση του ανέμου υπερεκτιμάται φτάνοντας την μέγιστη τιμή έως $1,75 \text{ ms}^{-1}$ για το σύνολο της περιόδου που εξετάζεται. Επίσης το bias παρουσιάζει και μια διακύμανση κατά τη διάρκεια της ημέρας με την μέγιστη τιμή να την παίρνει τις νυχτερινές και τις πρώτες πρωινές ώρες και την ελάχιστη τις μεσημεριανές ώρες όπου δεν πέφτει κάτω από $1,0 \text{ ms}^{-1}$ (Σχήμα 4.26). Το προγνωστικό σφάλμα κινείται σε αρκετά μεγάλες τιμές, όπου κάποιες φορές φτάνει μέχρι $3,5 \text{ ms}^{-1}$.

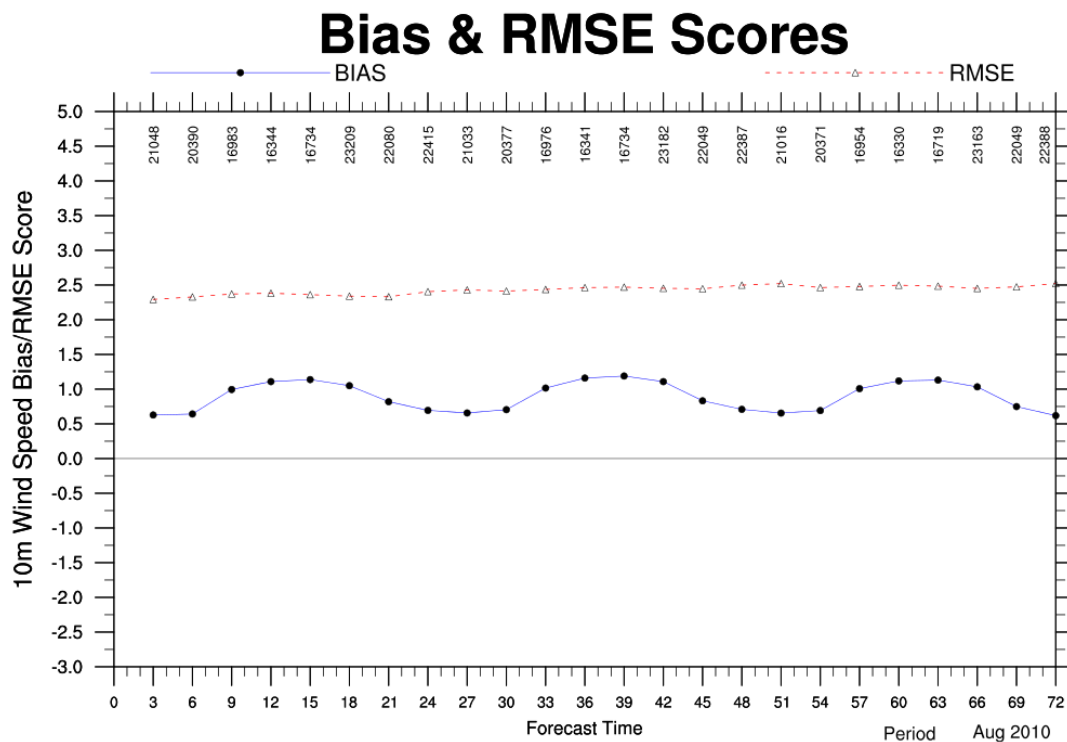


Σχήμα 4.26.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της έντασης του ανέμου στα 10m, Φεβρουάριος 2010. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Η άνοιξη δεν εμφανίζει διαφορές σε κανέναν από τους μήνες της, το RMSE και το bias παρουσιάζουν την ίδια εικόνα με αυτή του χειμώνα. Αυτό που ίσως πρέπει να αναφερθεί είναι μόνο ότι το μήνα Απρίλιο η ελάχιστη τιμή του bias παίρνει την τιμή $0,5 \text{ ms}^{-1}$.

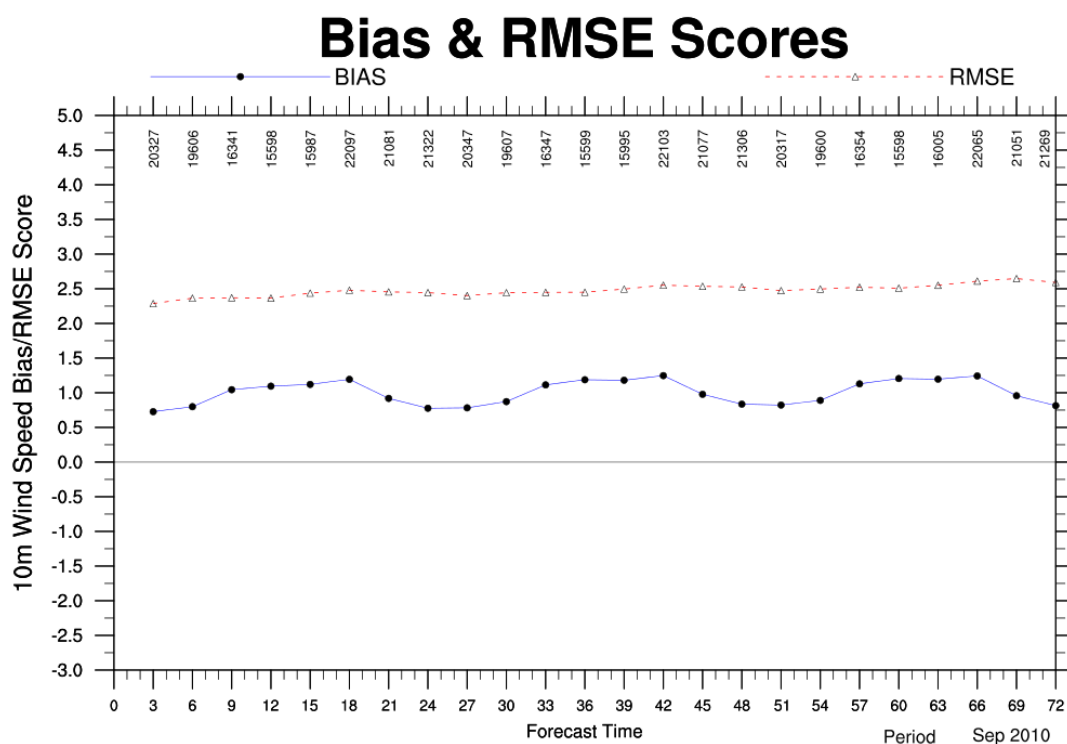
Σε αντίθεση με τον χειμώνα και την άνοιξη, τους καλοκαιρινούς μήνες, σύμφωνα με το Σχήμα 4.27, το σφάλμα παρουσιάζει μικρότερες τιμές που κυμαίνονται από $2,25 \text{ ms}^{-1}$ έως $2,55 \text{ ms}^{-1}$, άρα και μικρότερη εξάρτηση της έντασης από τον προγνωστικό χρόνο. Αυτό συμβαίνει γιατί το καλοκαίρι είναι η περίοδος της μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας και δημιουργούνται ισχυρότερες θερμικές κυκλοφορίες από τον υπόλοιπο χρόνο (Κατσαφάδος κ.α., 2012). Το συστηματικό σφάλμα εξακολουθεί να παρουσιάζει υπερεκτίμηση σε όλη την διάρκεια της προγνωστικής περιόδου, έχοντας τις μέγιστες τιμές τις πρώτες πρωινές ώρες και τις ελάχιστες τις μεσημεριανές.



Σχήμα 4.27.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της έντασης του ανέμου στα 10m, Αύγουστος 2010. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

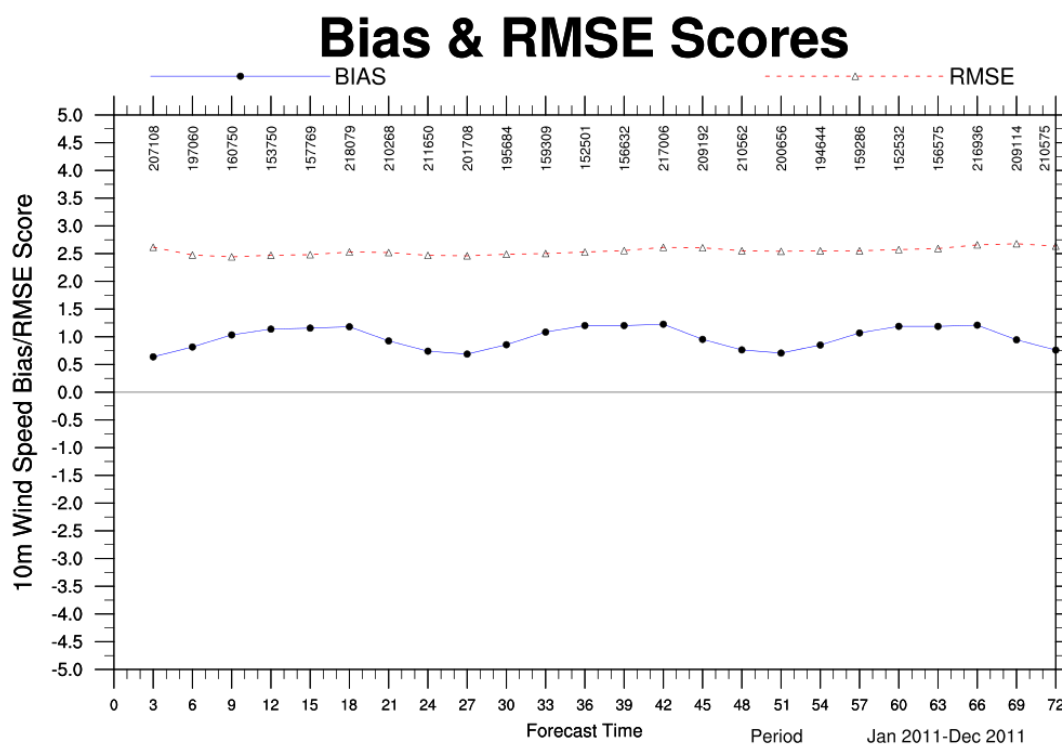
Το φθινόπωρο η τετραγωνική ρίζα του σφάλματος και το bias, επανέρχονται στις τιμές τις οποίες κυμαίνονταν και το χειμώνα. Μια μικρή διαφορά κάνει ο Σεπτέμβριος (Σχήμα 4.28), όπου το σφάλμα παραμένει σε μικρότερες τιμές, από $2,25 \text{ ms}^{-1}$ μέχρι $2,55 \text{ ms}^{-1}$, όπως και το καλοκαίρι, χωρίς να παρουσιάζει κάποια εξάρτηση της έντασης από τον χρόνο. Και το bias όμως ακολουθεί την καλοκαιρινή πορεία παρουσιάζοντας υπερεκτίμηση με την μέγιστη τιμή να εμφανίζεται τις πρώτες πρωινές ώρες και την ελάχιστη τις μεσημεριανές.



Σχήμα 4.28.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της έντασης του ανέμου στα 10m, Σεπτέμβριος 2010. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

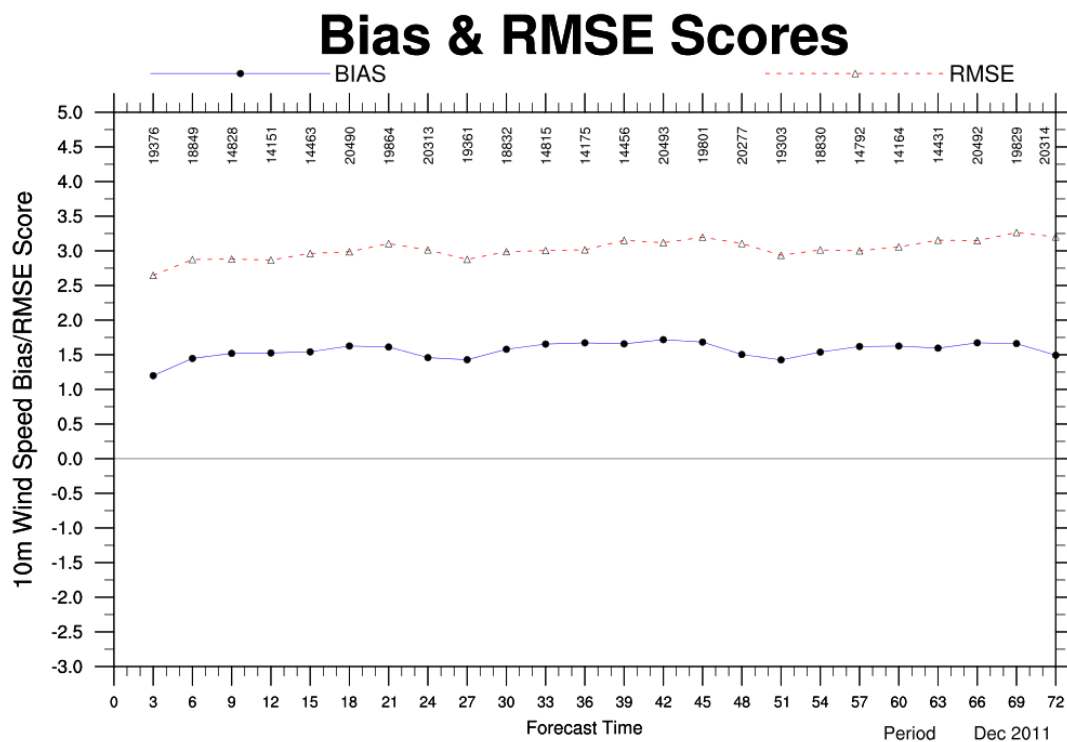
Συνεχίζοντας στον επόμενο χρόνο η χρονική διακύμανση του προγνωστικού σφάλματος και του συστηματικού σφάλματος για την ένταση του ανέμου στα 10m δεν παρουσιάζουν πολλές αλλαγές από αυτή που παρουσιάστηκε τον προηγούμενο χρόνο. Από το Σχήμα 4.29 διαπιστώνεται ότι το RMSE κινείται σε χαμηλότερες τιμές από ότι το 2010. Το εύρος τιμών στο οποίο κυμαίνεται είναι από $2,5 \text{ ms}^{-1}$ μέχρι $2,75 \text{ ms}^{-1}$, υποδηλώνοντας έτσι, μηδενική εξάρτηση της έντασης από την προγνωστικότητα. Το bias εμφανίζει συστηματική υπερεκτίμηση σε όλη τη διάρκεια της προγνωστικής περιόδου με μειωμένες τιμές. Η μέγιστη τιμή δεν φτάνει πάνω από $1,25 \text{ ms}^{-1}$, κυρίως τις πρωινές ώρες και η ελάχιστη δεν πέφτει κάτω από $0,75 \text{ ms}^{-1}$, όπου παρατηρείται τις μεσημεριανές ώρες.



Σχήμα 4.29.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της έντασης του ανέμου στα 10m, για το έτος 2011. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Στην μηνιαία ανάλυση των αποτελεσμάτων δεν συναντιούνται πολλές διακυμάνσεις μεταξύ των μηνών, γενικότερα η εικόνα είναι πιο ήπια από το 2010. Το χειμώνα παρατηρείται μια μικρή διαφορά στη τετραγωνική ρίζα του σφάλματος όπου κατά την διάρκεια των μηνών υπάρχουν μικρές αυξομειώσεις στην τιμή του προδίδοντας κάποια μικρή εξάρτηση της έντασης με τον προγνωστικό χρόνο. Φυσικά τον Δεκέμβριο το RMSE φτάνει τα $3,25 \text{ ms}^{-1}$ μέχρι και την 72^η ώρα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.30. Ακόμη και το bias το μήνα αυτό παίρνει την μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με τους υπόλοιπους μήνες και φτάνει μέχρι $1,75 \text{ ms}^{-1}$ κυρίως τις πρωινές ώρες.

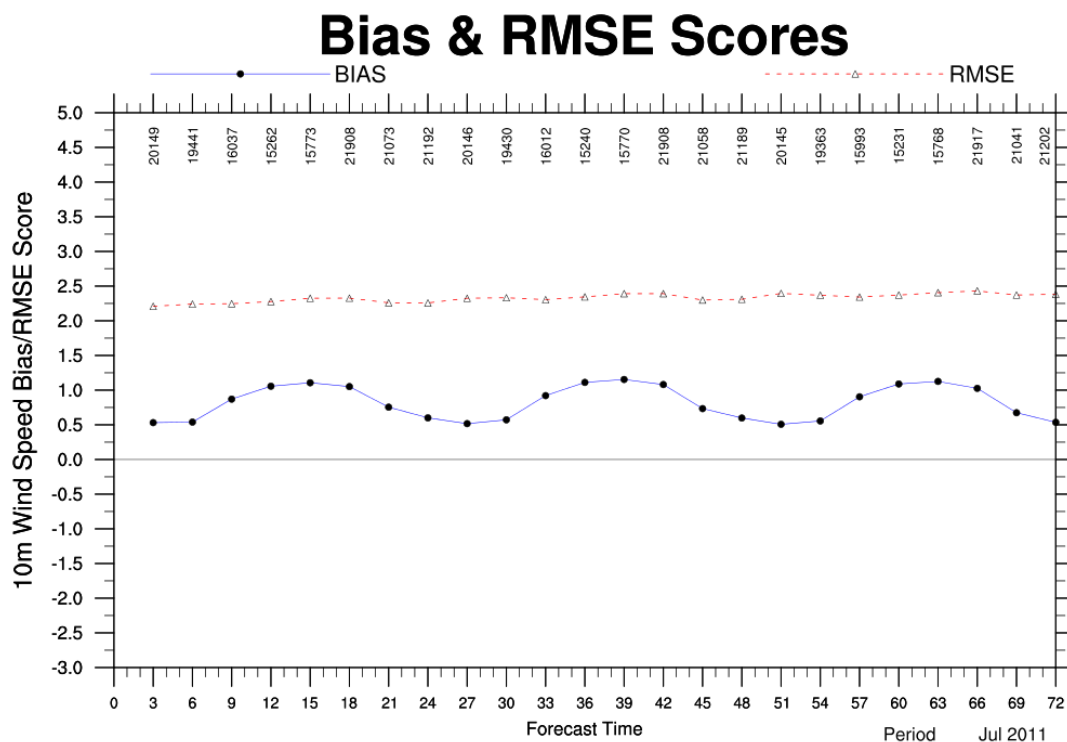


Σχήμα 4.30.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της έντασης του ανέμου στα 10m, Δεκέμβριος 2011. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Οι ανοιξιάτικοι μήνες δεν παρουσιάζουν αξιόλογες διαφορές, αφού το προγνωστικό σφάλμα κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $2,25 \text{ ms}^{-1}$ και $2,75 \text{ ms}^{-1}$ και το bias δεν πέφτει κάτω από $0,5 \text{ ms}^{-1}$ και δεν ξεπερνάει το $1,75 \text{ ms}^{-1}$.

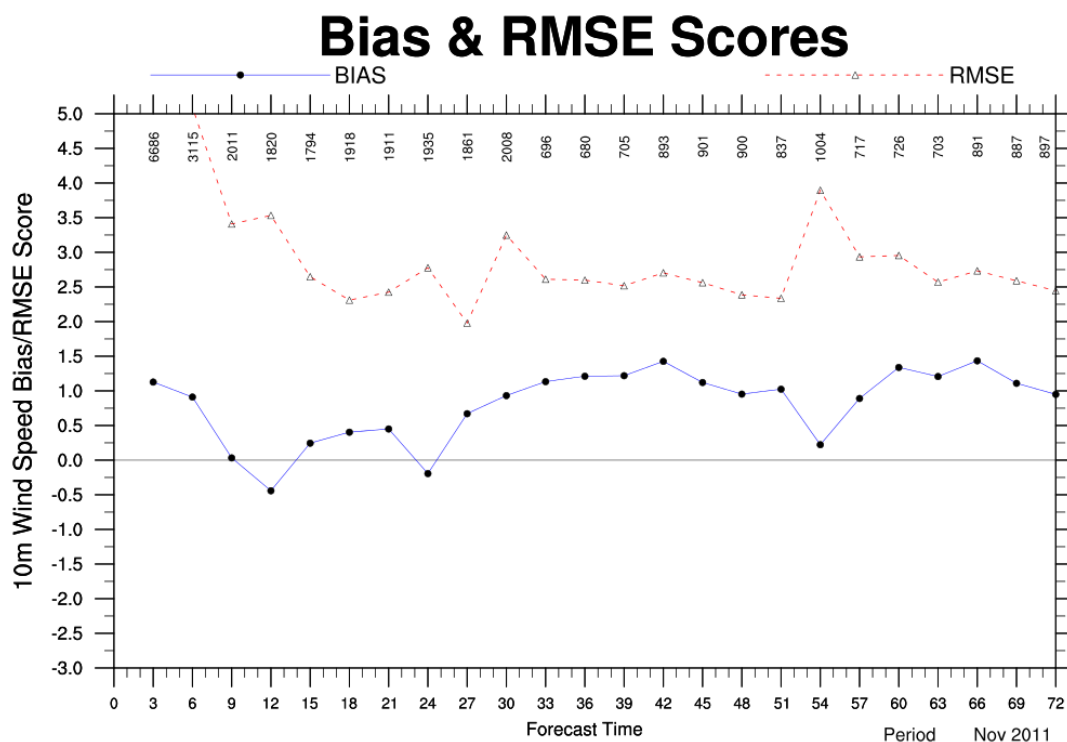
Το συστηματικό σφάλμα το καλοκαίρι δεν παρουσιάζει καμία διαφορά από την άνοιξη, συνεχίζει να δίνει υπερεκτίμηση για όλη την προγνωστική περίοδο και οι μέγιστες τιμές του εμφανίζονται τις πρωινές ώρες και τις ελάχιστες τις μεσημεριανές. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι η πορεία του προγνωστικού σφάλματος. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το καλοκαίρι είναι η θερμότερη περίοδος του χρόνου και για το λόγω αυτό αναπτύσσονται ισχυρότερες θερμές κυκλοφορίες, έτσι το RMSE το καλοκαίρι τείνει να ευθυγραμμιστεί στην τιμή $2,25 \text{ ms}^{-1}$, όπως δείχνει και το Σχήμα 4.31, πέρα από μια μικρή άνοδο την 72^η προγνωστική ώρα η οποία είναι πολύ κοντά στην τιμή που αναφέρθηκε.



Σχήμα 4.31.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της έντασης του ανέμου στα 10m, Ιούλιος 2011. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

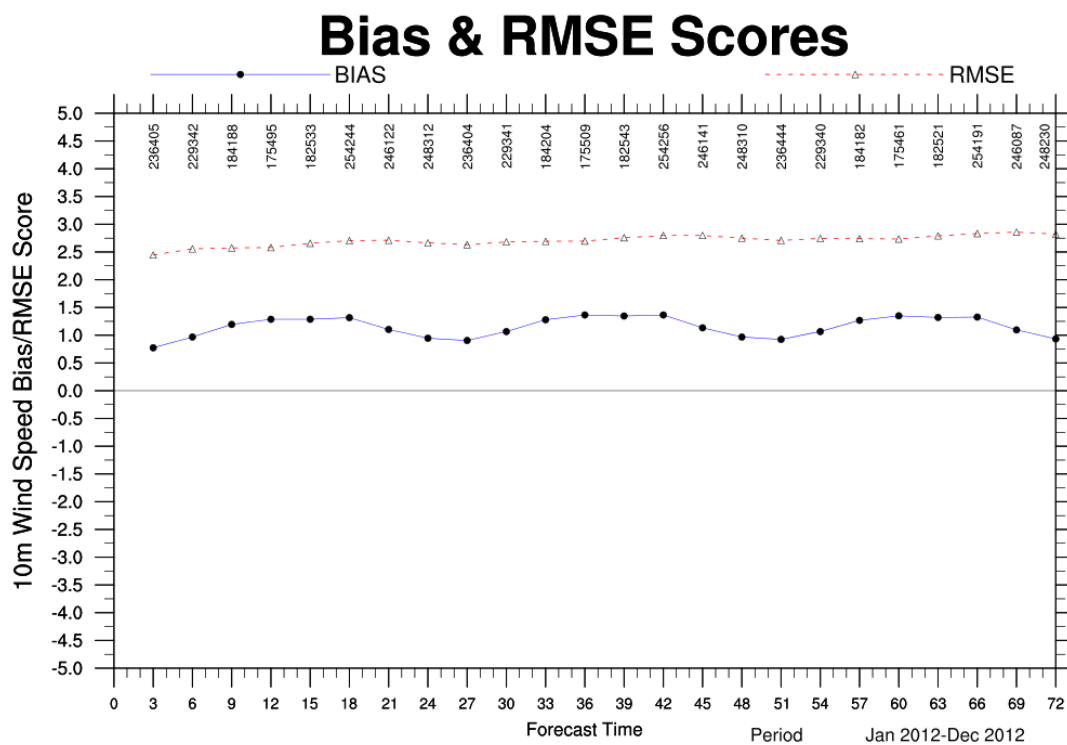
Την μεγαλύτερη και εντονότερη διαφορά μέχρι στιγμής την παρουσιάζει το φθινόπωρο και ο μήνας Νοέμβριος. Στο Σχήμα 4.32 φαίνεται το σφάλμα να μην έχει σταθερή πορεία, αλλά να παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις κατά την διάρκεια της περιόδου πρόγνωσης και να κινείται σε εύρος από $2,0 \text{ ms}^{-1}$ έως και πάνω από $5,0 \text{ ms}^{-1}$, δείχνοντας μια ισχυρή εξάρτηση της έντασης από τον χρόνο. Και το bias όμως δεν παρουσιάζει την σταθερή υπερεκτίμηση που φάνηκε έως τώρα. Αντίθετα τις πρώτες ώρες της πρόγνωσης παρουσιάζει υποεκτίμηση νυχτερινές και μεσημεριανές ώρες που φτάνει μέχρι $0,5 \text{ ms}^{-1}$. Από την 24^η προγνωστική ώρα και μετά εμφανίζει υπερεκτίμηση η οποία όμως δεν χαρακτηρίζεται από την ομαλότητα και σταθερότητα των προηγούμενων μηνών και ανέρχεται έως $1,5 \text{ ms}^{-1}$. Επίσης την 54^η ώρα παρουσιάζει έντονη πτώση που φτάνει μέχρι $0,25 \text{ ms}^{-1}$. Η συγκεκριμένη εικόνα συνδέεται με την σημαντική αύξηση του προγνωστικού σφάλματος και για την επιφανειακή θερμοκρασία την ίδια περίοδο (Σχήμα 4.32).



Σχήμα 4.32.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της έντασης του ανέμου στα 10m, Νοέμβριος 2011. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

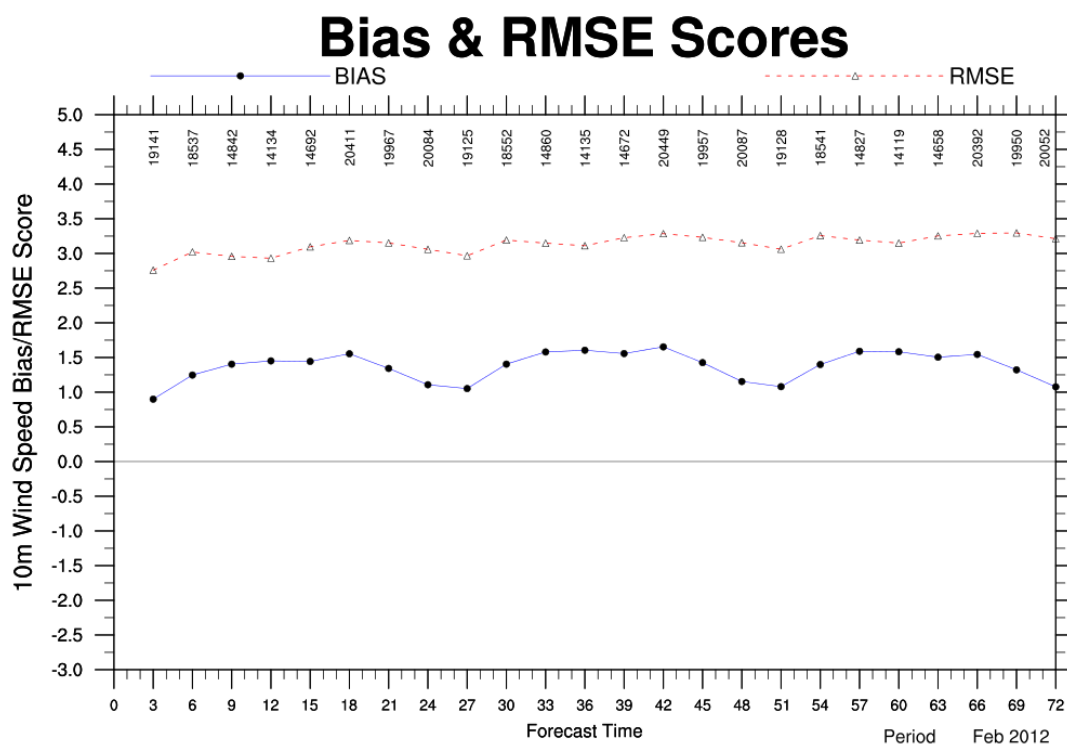
Το 2012 όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.33, παρουσιάζει μια πιο βελτιωμένη εικόνα και από τα τρία χρόνια που τεθήκαν σε επεξεργασία. Η τετραγωνική ρίζα του σφάλματος είναι σχεδόν ευθεία για ολόκληρη την προγνωστική περίοδο κοντά στην τιμή $2,25 \text{ ms}^{-1}$. Η πορεία του bias είναι πιο ομαλή και κινείται σε εύρος από $0,75 \text{ ms}^{-1}$ έως $1,25 \text{ ms}^{-1}$. Όπως και στα προηγούμενα χρόνια έτσι και εδώ οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της ημέρας ενώ η ελάχιστες κατά την διάρκεια του μεσημεριού.



Σχήμα 4.33.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της έντασης του ανέμου στα 10m, για το έτος 2012. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Όπως συνήθως έτσι και το 2012, ο χειμώνας είναι η περίοδος όπου το σφάλμα παίρνει τις μεγαλύτερες τιμές, λόγω την μικρότερης ηλιακής ακτινοβολίας. Το χρόνο αυτό η μεγαλύτερη τιμή του προγνωστικού σφάλματος παρατηρήθηκε το μήνα Φεβρουάριο (Σχήμα 4.34), όπου κυμαίνεται από $2,75 \text{ ms}^{-1}$ έως $3,25 \text{ ms}^{-1}$. Αυξημένο παρουσιάζεται και το bias το οποίο φτάνει να παίρνει μέγιστη τιμή μέχρι $2,0 \text{ ms}^{-1}$, ενώ και η ελάχιστη τιμή του είναι αυξημένη σε σχέση με τους χειμώνες των προηγούμενων ετών αφού ξεκινάει από $0,75 \text{ ms}^{-1}$.

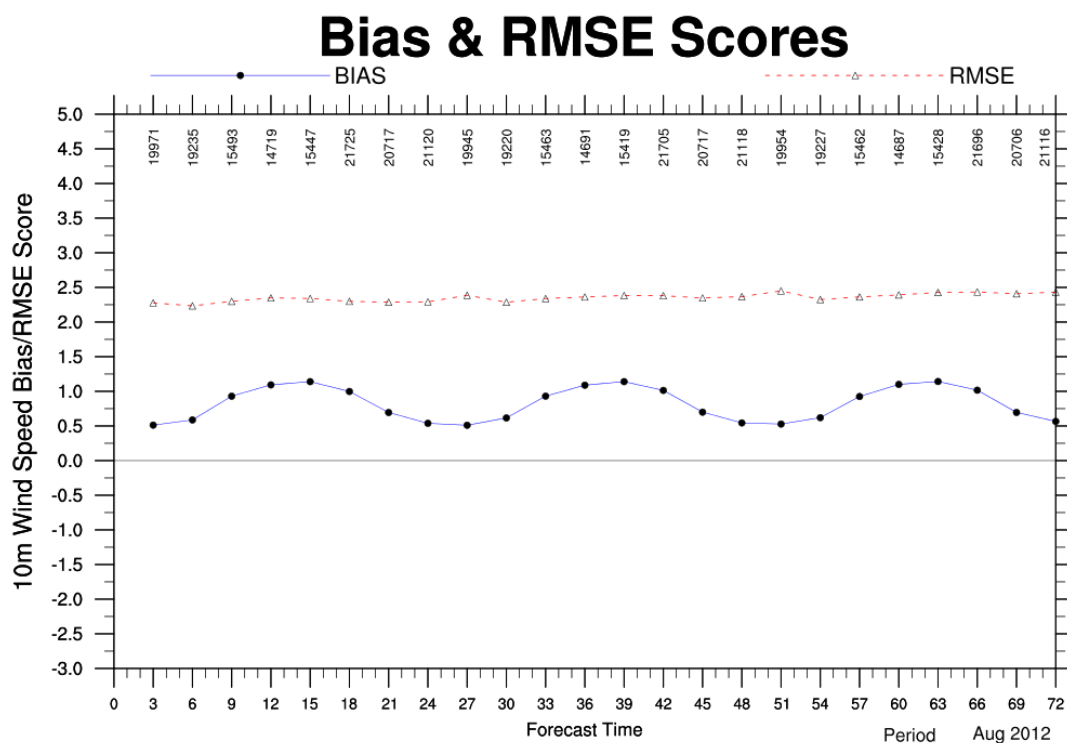


Σχήμα 4.34.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της έντασης του ανέμου στα 10m, Φεβρουάριος 2012. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Και αυτό τον χρόνο η άνοιξη δεν αποτελεί εξαίρεση και θα συνεχίσει να μην παρουσιάζει αξιολογικές διαφορές σε σχέση τόσο με την συνολική εικόνα του χρόνου, όσο και με την εικόνα των υπόλοιπων μηνών.

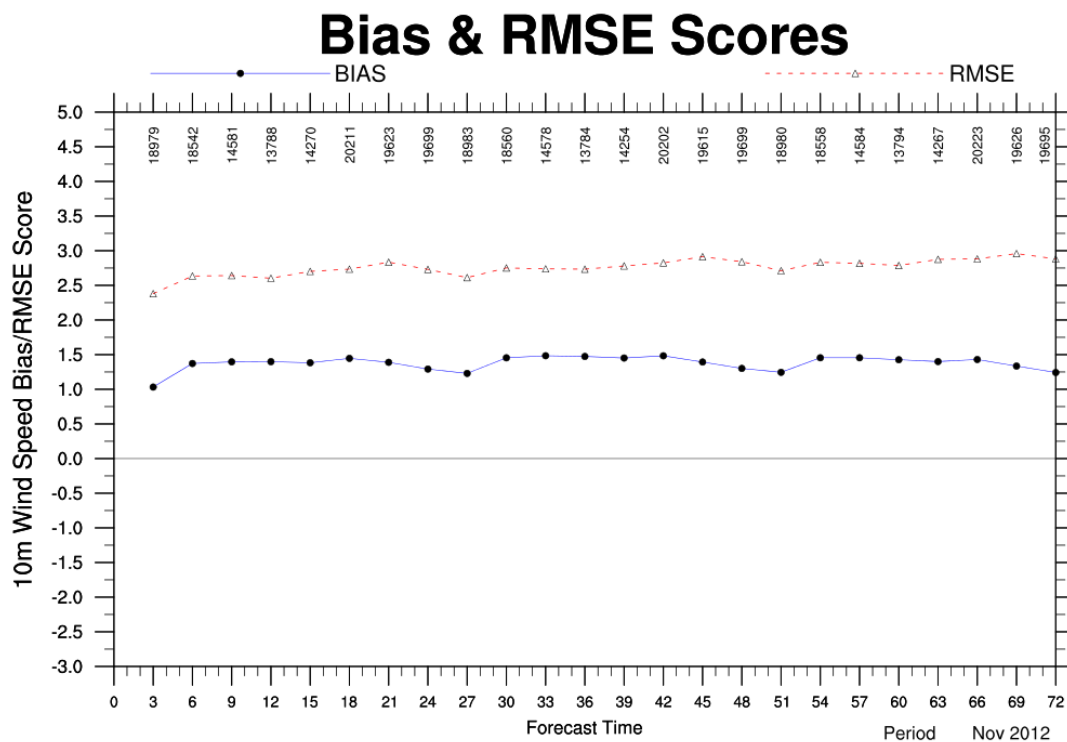
Σε αντίθεση με την άνοιξη, το καλοκαίρι και αυτού του χρόνου, για τους λόγους που έχουν αναφερθεί τα δυο προηγούμενα, παρουσιάζει το προγνωστικό σφάλμα να κινείται σε ευθεία γραμμή με τον χρόνο κοντά στην τιμή $2,25 \text{ ms}^{-1}$. Βέβαια κοιτώντας προσεχτικά τον Αύγουστο στο Σχήμα 4.35, παρατηρείται ότι όταν το συστηματικό σφάλμα παίρνει την ελαχιστη τιμή του το RMSE παρουσιάζει μικρή άνοδο. Το bias εμφανίζει καμία διαφορά στην πορεία του από τους προηγούμενους μήνες, πέρα από το ότι η ελάχιστη τιμή του είναι $0,5 \text{ ms}^{-1}$.



Σχήμα 4.35.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της έντασης του ανέμου στα 10m, Αύγουστος 2012. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Τέλος το φθινόπωρο του 2012 παρουσιάζει μια μικρή διαφορά στο bias για το μήνα Νοέμβριο (Σχήμα 4.36), αλλά τίποτα δεν θυμίζει αυτή του προηγούμενου χρόνου. Το συστηματικό σφάλμα εδώ φαίνεται να κινείται σε ευθεία με το χρόνο παίρνοντας την τιμή $1,5 \text{ ms}^{-1}$, εκτός από τις μεσημεριανές ώρες που παρουσιάζει μια μικρή πτώση που φτάνει μέχρι $1,0 \text{ ms}^{-1}$. Παρατηρώντας το σφάλμα διαπιστώνεται ότι ακολουθεί πιστά την πορεία του bias, παίρνοντας τις ελάχιστες τιμές τις ίδιες ώρες.



Σχήμα 4.36.: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE και bias της έντασης του ανέμου στα 10m, Νοέμβριος 2012. Στον πάνω άξονα αναφέρεται ο δειγματικός χώρος ανά ώρα αξιολόγησης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

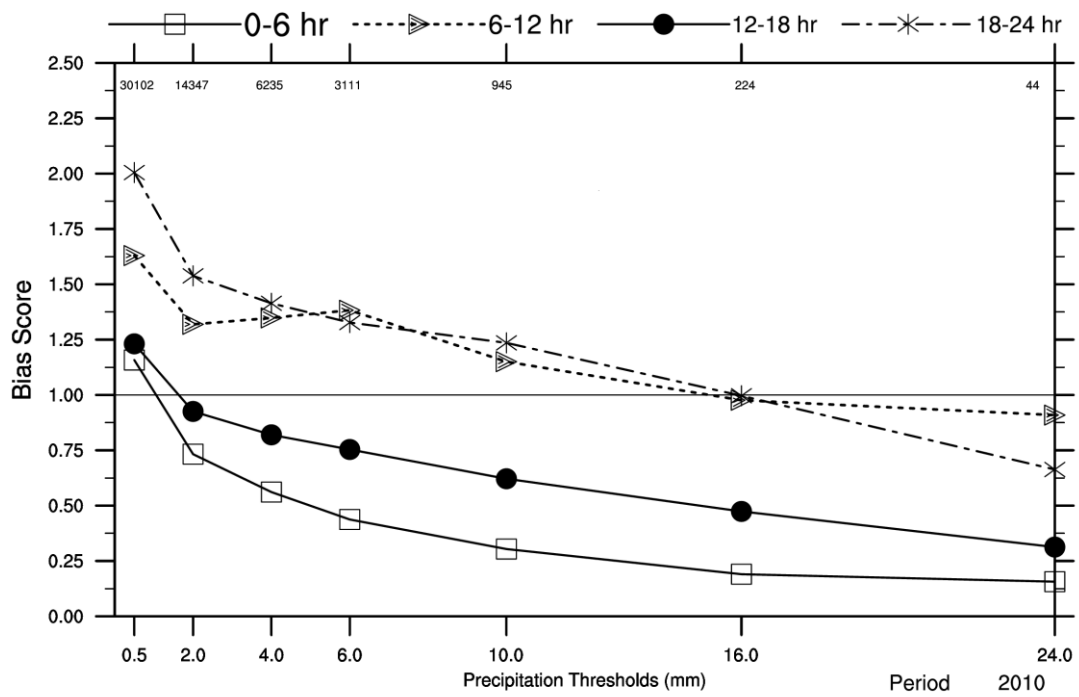
4.4 Βροχόπτωση

Τελευταίος δείκτης που εξετάστηκε είναι αυτός της βροχόπτωσης και εδώ θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα για το συστηματικό σφάλμα, το οποίο εκτιμήθηκε για την αθροιστική βροχόπτωση ανά 6ωρο για τις χρονιές 2010, 2011 και 2012. Τα αποτελέσματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται για την βροχόπτωση προκύπτουν από την χρήση της προσέγγισης του πίνακα συνάφειας, όπου κάθε στοιχείο εκτιμά τον αριθμό των περιστατικών στα οποία οι μετρήσεις του μετρητή και των προβλέψεων του μοντέλου υπερβαίνουν ή αποτυγχάνουν να φθάνουν ένα ορισμένο όριο για μια δεδομένη περίοδο των προβλέψεων. Για την καλύτερη ανάλυση του χωρίστηκε σε επτά διακριτές κλάσεις των 0.5, 2, 4, 6, 10, 16 και 24 mm που αντιστοιχούν σε χαμηλή μεσαία και ισχυρή βροχόπτωση.

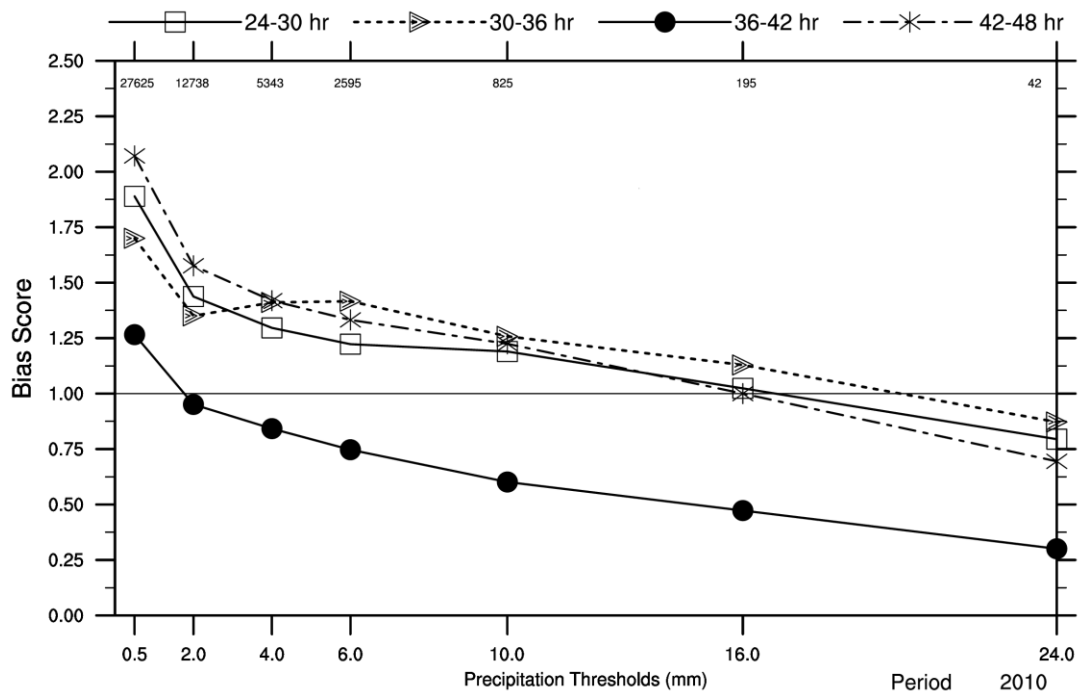
Στο *Σχήμα 4.37(α)* παρουσιάζεται το bias για το πρώτο 24ωρο του 2010, το οποίο για τα μικτά ύψη εμφανίζει υπερεκτίμηση για το σύνολο των 6ωρων και παίρνει την μέγιστη τιμή 2,10 κατά την περίοδο 18-24. Για τις περιόδους 0-6 και 12-18 παρουσιάζει υποεκτίμηση για τα υπόλοιπα ύψη, όπου παίρνει και την ελάχιστη τιμή του στο διάστημα 0-6 που είναι 0,25. Αντιθέτως τις περιόδους 6-12 και 18-24 μέχρι τα 16 mm το συστηματικό σφάλμα υπερεκτιμάται, ενώ από τα 16 mm έως τα 24 mm υποεκτιμάται.

Στα *Σχήματα 4.37 (β) και (γ)* παρουσιάζεται το bias για τα επόμενα δυο 24ωρα, τα οποία παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά μεταξύ τους. Έτσι για τα ύψη από 0,5 mm έως 16 mm, εμφανίζει υπερεκτίμηση για όλες τις περιόδους των δύο 24ωρο παίρνοντας και την μέγιστη τιμή του που φτάνει μέχρι 2,125. Για τα ύψη από 16 mm έως 24 mm, υποεκτιμάται και παίρνει ελάχιστη τιμή 0,5 τις περιόδους 36-42 και 60-66.

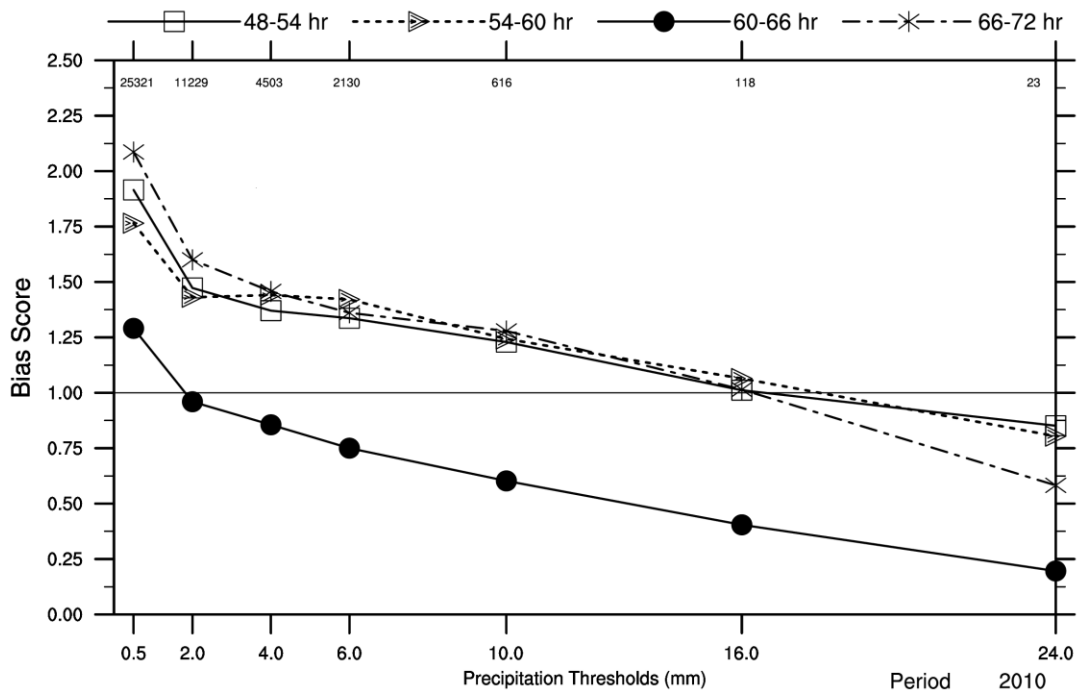
(a)



(β)



(γ)

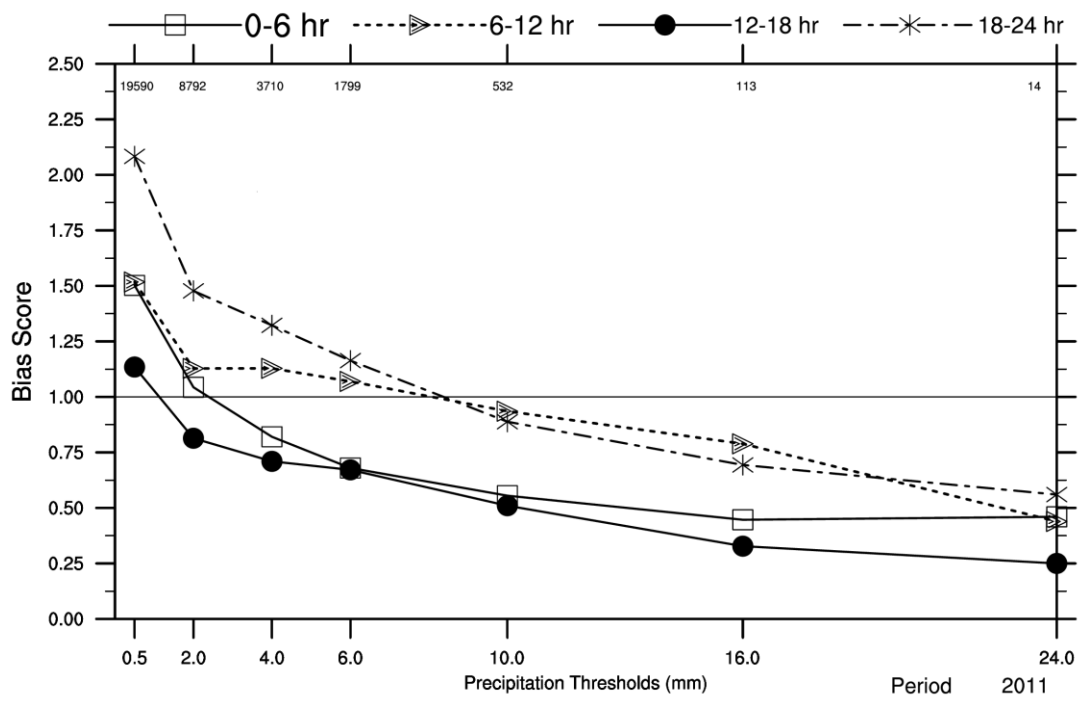


Σχήμα 4.37: Διακύμανση του συστηματικού σφάλματος της αθροιστικής 6ωρης βροχόπτωσης για το (α) πρώτο 24ωρο, (β) δεύτερο 24ωρο και (γ) τρίτο 24ωρο του 2010.

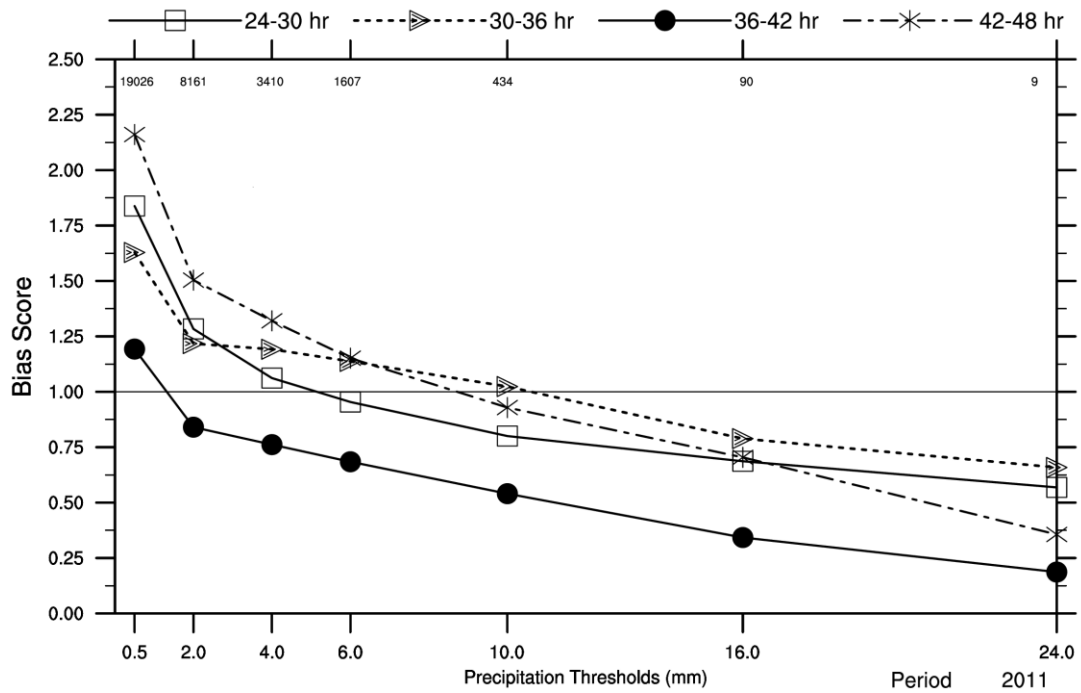
Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το συστηματικό σφάλμα για τα τρία 24ωρα του 2011. Το πρώτο 24ωρο φαίνεται στο Σχήμα 4.38 (α), όπου για τις περιόδους 0-6 και 12-18 στα μικρά ύψη, 0,5 mm έως 2,0 mm, το bias εμφανίζει υπερεκτίμηση, ενώ στη συνέχεια και μέχρι τα 24 mm υποεκτιμάται και παίρνει ελάχιστη τιμή 0,25. Οι περίοδοι 6-12 και 18-24 μέχρι τα ύψη 6 mm παρουσιάζουν υπερεκτίμηση με μέγιστη τιμή 2,125, ενώ μέχρι τα 24 mm παρουσιάζουν υποεκτίμηση. Ανάλογη συμπεριφορά εμφανίζουν και τα επόμενα 24ωρα με αναμενόμενη υπερεκτίμηση από τα 0,5 mm έως 6 mm και υποεκτίμηση μέχρι τα ύψη των 24 mm. Το 2011 η υποεκτίμηση των δυο τελευταίων 24ωρων ξεκινάει από μικρότερα ύψη (των 6 mm), σε αντίθεση με τα αντίστοιχα 24ωρα του 2010.

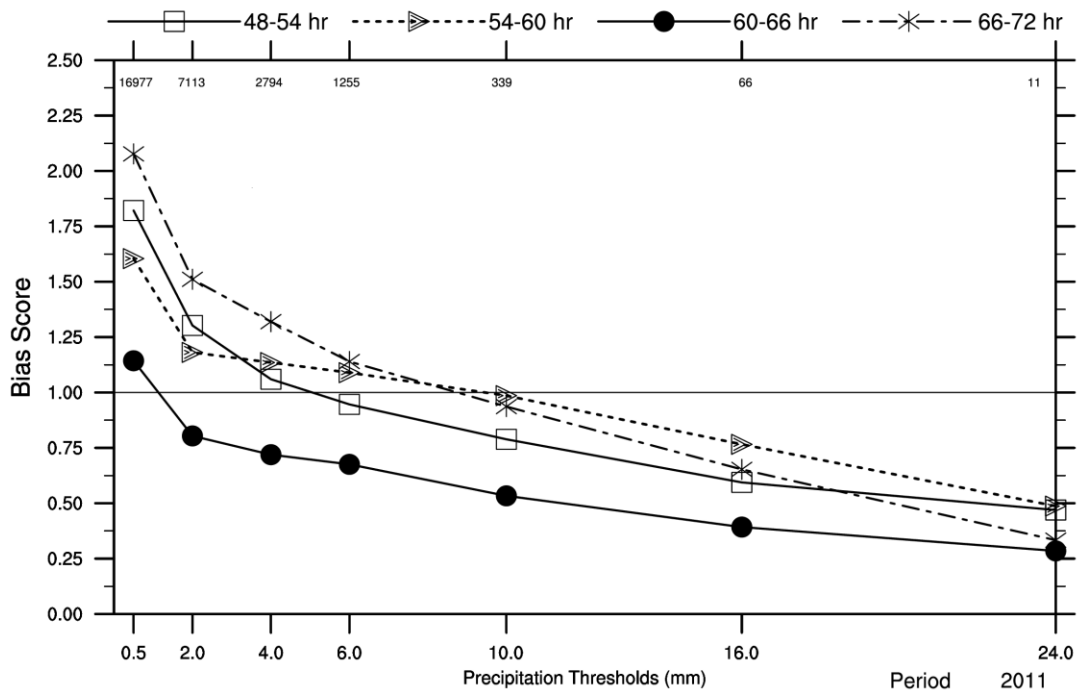
(a)



(β)



(γ)



Σχήμα 4.38: Διακύμανση του συστηματικού σφάλματος της αθροιστικής δωρης βροχόπτωσης για το (α) πρώτο 24ωρο, (β) δεύτερο 24ωρο και (γ) τρίτο 24ωρο του 2011.

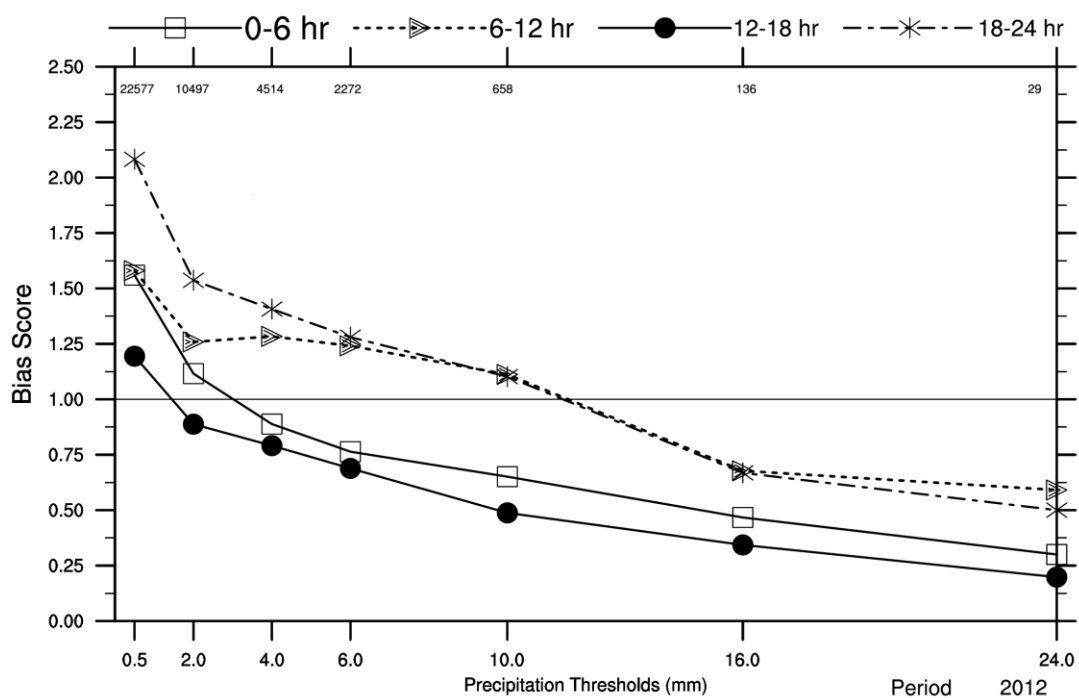
Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Τέλος στο Σχήμα 4.39 παρουσιάζεται το bias για τα αθροιστικά δωρα των τριών 24ωρων για το έτος 2012. Για το πρώτο 24ωρο (Σχήμα 4.39 (α)), παρατηρείται ότι τις περιόδους 0-6 και 12-18 για τα ύψη από 0,5 mm μέχρι 2 mm, αλλά και τα δωρα 6-12 και 18-24 για τα ύψη από 0,5 mm έως 10 mm, το συστηματικό σφάλμα παρουσιάζει υπερεκτίμηση. Την μέγιστη τιμή 2,125 την παίρνει κατά την περίοδο 18-24, ενώ την ελάχιστη 0,50 κατά την περίοδο 12-18. Από τα ύψη που αναφέρθηκαν παραπάνω μέχρι τα 24 mm και για τις αντίστοιχες περιόδους μέχρι τα 24 mm το bias υποεκτιμάται. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και το τρίτο 24ωρο με υπερεκτίμηση των μικρών και μεσαίων υψών και υποεκτίμηση των μεγαλύτερων.

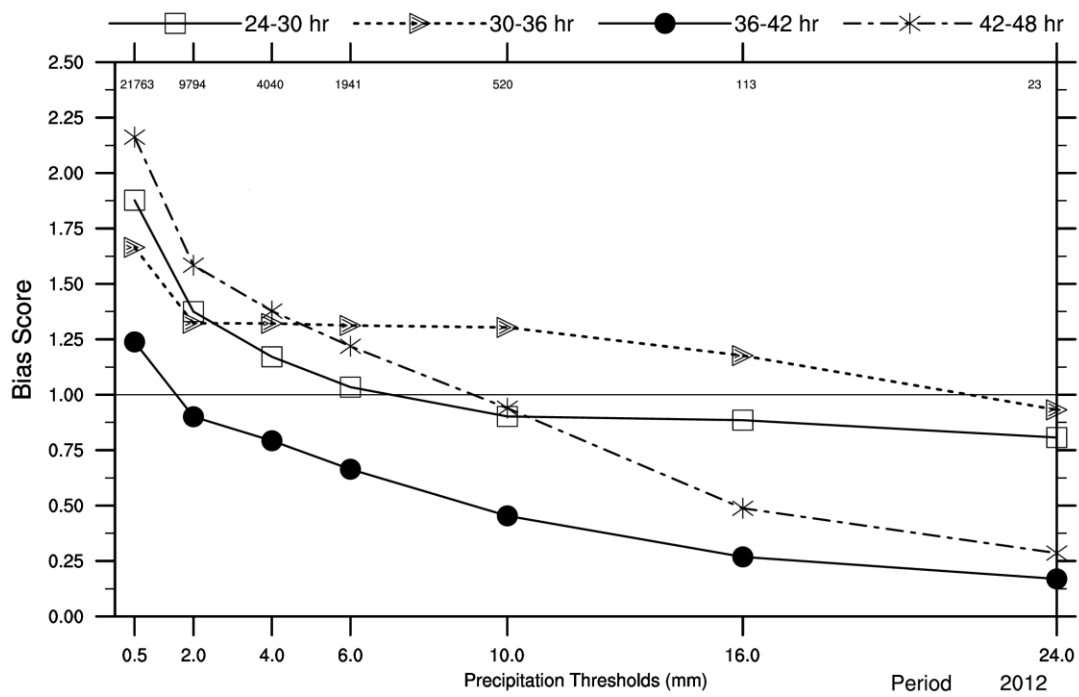
Το δεύτερο 24ωρο (Σχήμα 4.39 (β)) κάνει την διαφορά, όπου το bias παρουσιάζει λίγο διαφορετική συμπεριφορά, όχι τόσο κατά την περίοδο 36-42, που παραμένει όπως και το πρώτο 24ωρο, όσο για στις υπόλοιπες περιόδους. Αισθητή διαφορά υπάρχει την περίοδο 30-36 όπου το

συστηματικό σφάλμα εμφανίζει υπερεκτίμηση για το μεγαλύτερο μέρος των υψών, εκτός από αυτό των 24 mm, που υποεκτιμάται. Σε αντίθεση με την αντίστοιχη περίοδο των δύο προηγούμενων χρόνων, όπου η υποεκτίμηση ξεκινά από τα 16 mm το 2010 και από τα 10 mm για το 2011. Τις άλλες δυο περιόδους μέχρι τα 10 mm υπερεκτιμάται και παίρνει την μέγιστη τιμή περίπου 2,25 την περίοδο 42-48, όπως ακριβώς και το 2011 γιατί το 2010 την περίοδο 42-48 η υπερεκτίμηση φτάνει μέχρι τα 16 mm.

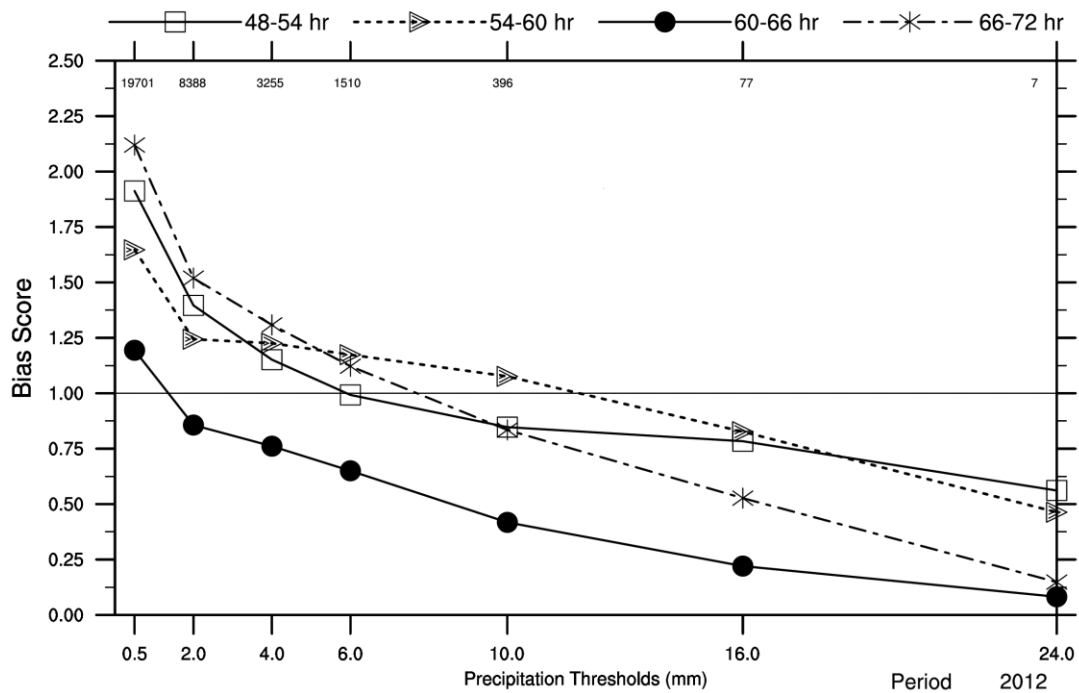
(α)



(β)



(γ)



Σχήμα 4.39: Διακύμανση του συστηματικού σφάλματος της αθροιστικής 6ωρης βροχόπτωσης για το (α) πρώτο 24ωρο, (β) δεύτερο 24ωρο και (γ) τρίτο 24ωρο του 2012.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Συμπεράσματα

Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά του αριθμητικού μη υδροστατικού μοντέλου WRF με δυναμικό πυρήνα NNM, το οποίο λειτουργεί επιχειρησιακά στο Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, για την περίοδο αξιολόγησης 2010–2012. Έχει εγκατασταθεί και προσαρμοστεί, από την Ομάδα Δυναμικής της Ατμόσφαιρας και του Κλίματος (ΟΔΑΚ) του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου Αθηνών (ΧΠΑ), στις υπολογιστικές εγκαταστάσεις του Τμήματος Γεωγραφίας. Επίσης επιχειρήθηκε η στατιστική αξιολόγηση των προγνώσεων για περίοδο 3 ετών (2010-2012). Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε επίσης κατάλληλη μεθοδολογία και λογισμικό για την αποτίμηση των προγνώσεων του μη υδροστατικού αριθμητικού μοντέλου WRF-NMM. Το πεδίο ολοκλήρωσης των προσομοιώσεων αποτελείται από την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου και της Ευρώπης ενώ ο χρονικός ορίζοντας των προγνωστικών προϊόντων είναι 120 ώρες. Τα κύρια προγνωστικά προϊόντα του μοντέλου περιλαμβάνουν την ατμοσφαιρική πίεση στη μέση στάθμη θάλασσας, την θερμοκρασία του ανέμου στα 2m, την ένταση του ανέμου στα 10m και τη βροχόπτωση.

Με βάση τους στατιστικούς δείκτες το μοντέλο παρουσιάζει ικανοποιητική προγνωστική συμπεριφορά για όλα τα προγνωστικά πεδία που αξιολογήθηκαν στο σύνολο της περιόδου αξιολόγησης, από τον Ιανουάριο του 2010 έως το Δεκέμβριο του 2012. Η ατμοσφαιρική πίεση στη ΜΣΘ παρουσιάζει σταδιακή αύξηση του προγνωστικού σφάλματος με το χρόνο και συνδυάζεται με περιορισμένη υποεκτίμηση στο σύνολο της προγνωστικής περιόδου. Επίσης φαίνεται το μοντέλο να αναπαριστά με επιτυχία την έντονη κινητικότητα των ατμοσφαιρικών διαταραχών κυρίως κατά την χειμερινή περίοδο.

Το σφάλμα φαίνεται να μην παρουσιάζει κάποια εξάρτηση της θερμοκρασίας από το χρόνο πρόγνωσης, ενώ το bias εμφανίζει περιοδική υποεκτίμηση κυρίως τις νυχτερινές ώρες για όλη την περίοδο αξιολόγησης (Ιανουάριος 2010 έως Δεκέμβριος 2012). Κατά τη θερινή περίοδο το συστηματικό σφάλμα

παρουσιάζει συστηματική υποεκτίμηση, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί σε πιθανό έλλειμμα υγρασίας στο έδαφος που πιθανότατα να προέρχεται από την αρχικοποίηση του μοντέλου ή από τη λειτουργία του υπομοντέλου εδάφους (Κατσαφάδος κ.α., 2012). Επίσης η υποεκτίμηση μπορεί να αποδοθεί στην λειτουργία του σχήματος ακτινοβολιών του μοντέλου κατά την περίοδο της μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας.

Η ένταση του ανέμου υπερεκτιμάται συστηματικά φτάνοντας την μέγιστη τιμή κατά τη διάρκεια των χειμερινών περιόδων, γεγονός που αποδεικνύει ότι το μοντέλο καταφέρνει να αναπαριστά με επιτυχία τις θερμικές κυκλοφορίες που δημιουργούνται κατά την περίοδο του καλοκαιριού, που θεωρείται και περίοδος μέγιστης ακτινοβολίας. Κατά την θερινή περίοδο το προγνωστικό σφάλμα έχει την τάση να ευθυγραμμιστεί κοντά στην τιμή $2,25\text{ms}^{-1}$.

Τέλος σε ότι αφορά την αξιολόγηση της προγνωστικότητας του αθροιστικού υετού παρατηρείται συστηματική υπερεκτίμηση των μικρών υψών υετού, κυρίως για τις περιόδους 6-12, 18-24, 30-36, 42- 48, 54-60 και 66-72, ενώ για τις περιόδους 0-6, 12-8, 24-30, 36-42, 48-54 και 60-66 το συστηματικό σφάλμα εμφανίζει υποεκτίμηση από αρκετά νωρίς (στο ύψος 0,5mm).

Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι το συγκεκριμένο ατμοσφαιρικό, μη υδροστατικό προγνωστικό σύστημα WRF-NMM, το οποίο λειτουργεί επιχειρησιακά στο Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο εκτίμησης του καιρού για τον ελλαδικό χώρο και την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου. Ως συνέχεια αυτής της εργασίας θα μπορούσε να ήταν η αξιολόγηση πεδίων ανώτερης ατμόσφαιρας αλλά και η χωρική κατανομή των σφαλμάτων για να μπορέσουν να εντοπιστούν οι περιοχές στις οποίες εμφανίζονται αλλά και για την βελτίωση του υπομοντέλου εδάφους.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Andreas Grantinger, 2007: *Evaluation of WRF over Europe and Africa*, Meteorological and Oceanographic Center.
- Atsushi Hashimoto, Hattori Y., 2008: Kadokura S., *The forecasting system for wind power generation combined use of numerical and statistical models*, Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan.
- Bianco Laura, 2008: *Surface layer parameterization in WRF, ATOC 7500: Mesoscale Meteorological Modeling*, Spring 2008.
- Black, T., E. Rogers, Z. Janjic, 2002: H. Chuang, and G. DiMego, *Forecast guidance from NCEP's high resolution non hydrostatic mesoscale model. Preprints*, 15th Conf. on Numerical Weather Prediction, San Antonio, TX, American Meteorological Society, J23-J24.
- Brian A. Colle, Clifford F. mass and Kenneth J. Westrick, 2000: *MM5 Precipitation Verification over the Pacific Northwest during the 1997–99 Cool Seasons*, Weather and Forecasting, 15,730-744.
- Brian A. Colle, Joseph B. Olson, and Jeffrey S. Tongue, 2001: *Verification of the Eta and Real-Time MM5 over the Eastern U.S.*, Institute for Terrestrial and Planetary Atmospheres, SUNY- Stony Brook, NY NOAA/NWSFO, Upton, NY, 1-4.
- Clifford F. Mass, David Ovens, Ken Westrick, and Brian A. Colle, 2002: *Does Increasing Horizontal Resolution PRoduce More Skillful Forecasts? The Results of Two Years of Real-Time Numerical Weather Prediction over the Pacific Northwest*, American Meteorological Society, 407-430.
- Daniel S. Wilks, 1995: *Statistical Methods in Atmospheric Sciences*, Volume 59, New York.

- Dudhia, J., 2009: «*WRF physics options*», 10th Annual meeting of WRF users, National Center for Atmospheric Research, June 23 - 26, 2009, USA.
- Ferrier, B.S., Y. Jin, Y. Lin, T. Black, E. Rogers, and G. DiMego, 2002: «*Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta model*», Preprints, 15th Conf. on Numerical Weather Prediction, San Antonio, TX, American Meteorological Society, 280-283.
- Gozzini B., Bartolini G., Grifoni D., Messeri G., Pasi F., Piani F., Rossi M., Tei C., 2008: *Evaluation of Year 2007 Operational WRF-NMM*, 9th WRF workshop Boulder, Colorado, 23-27.
- Γκίκας Ν., Μαυροματίδης Η., Παπαδόπουλος Α., Κατσαφάδος Πέτρος, 2010: 9^ο Πανελλήνιο Γεωγραφικό Συνέδριο, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, 1-8.
- Katsafados P., Papadopoulos A., Mavromatidis E. and Gikas N., 2011: *Quantitative Verification Statistics of WRF Predictions Over the Mediterranean Region*, 12th Annual WRF Users' Event, 20-24 June 2011, Boulder CO, USA, 1-6.
- Κατσαφάδος Π., 2007: *Αρχές Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας*, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα, 14-17.
- Κατσαφάδος Π., Μαυροματίδης Η., Γκίκας Ν., Καλογήρου Σ., 2010: *Ιστοσελίδα Πρόγνωσης Καιρού του Χαροκοπέιου Πανεπιστημίου: Δομή και Προγνωστικά Προϊόντα*, Αθήνα.
- Κατσαφάδος Π., Μαυροματίδης Η., Γκίκας Ν., Παπαδόπουλος Α., 2012: *Το Σύστημα Πρόγνωσης Καιρού του Χαροκοπέιου Πανεπιστημίου και Στατιστική Αξιολόγηση των Αποτελεσμάτων*, Περιοδικό Γεωγραφίες, Τεύχος 20, 1-19.
- Κουκούλα Μαρίκα, 2011: *Ανάλυση της χωροχρονικής μεταβλητότητας της εδαφικής υγρασίας και θερμοκρασίας για τον Ελλαδικό χώρο*, Προπτυχιακή διπλωματική εργασία, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών.

- Mercader J., B. Codina, A. Sairouni and J. Cunillera, 2010: *Results of the meteorological model WRF-ARW over Catalonia, using different parameterizations of convection and cloud microphysics*, Tethys: Journal of Mediterranean Meteorology and Climatology, 7, 75–86.
- Nachamkin, J. E., and R. M. Hodur, 2000: *Verification of short-term forecasts from the Navy COAMPS over the Mediterranean*, Preprints, 15th Conf. on Statistics and Probability in the Atmospheric Sciences, Asheville, NC, American Meteorological Society, 54–57.
- Papadopoulos A. and Katsafados P., 2009: *Verification of operational weather forecasts from the POSEIDON system across the Eastern Mediterranean*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 9, 4, 1299-1306.
- Phillips, N. A. , 1957: *A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting*, Journal of Meteorology, 14, 184-185.
- Roux G., Y. Liu, L.D. Monache, R.S. Shey and T.T. Warner, 2008: *Verification of High Resolution WRF-STFDDA Surface Forecasts over mountains and plains*, 9th WRF workshop, Boulder, Colorado, 23-47 27 June 2008.
- Wei Wang, Chris Davis, Joe Klemp, Greg Holland, and Mark DeMaria, 2006: *Evaluation of WRF-ARW high-resolution tropical storm forecasts in the 2005 season*, 27th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Monterey, California, United States.
- William Y. Y. Cheng and W. James Steenburgh, 2005: *Evaluation of Surface Sensible Weather Forecasts by the WRF and the Eta Models over the Western United States*, Weather and Forecasting, 20, 812-821.

- Zavis Janjic, Z., and A. Wiin-Nielsen, 1977: *On geostrophic adjustment and numerical procedures in a rotating fluid*, Journal of Atmospheric Sciences, 34, 297–310.
- Zavis Janjic, J. P. Gerrity, S. Nickovic, 2001: *An alternative Approach to nonhydrostatic modeling*, Monthly Weather Review, 129: 1164-1178.
- Zavis Janjic, 2002: *A nonhydrostatic model based on a new approach*, Meteorology and Atmospheric Physics, 271-285.
- Janjic, Z., T. Black, E. Rogers, H. Chuang, and G. DiMego, 2003: *The NCEP nonhydrostatic mesoscale forecasting model*, Extended abstract, 10th Conference on Mesoscale Processes, Portland, OR, American Meteorological Society, online.
- Zavis Janjic, Thomas Black, Matthew Pyle, Hui-ya Chuang, Eric Rogers and Geoffrey DiMego, 2005: *High Resolution Applications of the WRF NMM*, 21st Conference on Weather Analysis and Forecasting/17th Conference on Numerical Weather Prediction, American Meteorological Society, July 31 August 5, Washington.
- Zavis Janjic, 2008: *The WRF NMM Core*, National Weather Service, National Centers for Environmental Prediction, NOAA.