

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΓΝΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΟΥ ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ

Γκίκας Νικόλαος¹, Ηλίας Μαυροματίδης¹, Αναστάσιος Παπαδόπουλος²
& Πέτρος Κατσαφάδος¹

¹ Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωγραφίας

² Ινστιτούτο Εσωτερικών Υδάτων, Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών

Περίληψη

Από τον Ιανουάριο 2008 το μη υδροστατικό μοντέλο περιορισμένης περιοχής WRF έχει εγκατασταθεί και κατάλληλα προσαρμοστεί στην παράλληλη υπολογιστική υποδομή του Τμήματος Γεωγραφίας του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου Αθηνών παράγοντας υψηλής ανάλυσης προγνώσεις καιρού. Τα προϊόντα του μοντέλου σε πλεγματική μορφή καλύπτουν το σύνολο της Μεσογείου και της Μαύρης Θάλασσας παρέχοντας προγνωστικά πεδία μέχρι 120 ώρες (5 ημέρες). Μετά από 2 έτη συνεχούς επιχειρησιακής λειτουργίας σε καθημερινή βάση έχει δημιουργηθεί σημαντική βάση μετεωρολογικών δεδομένων που υπερβαίνει το 1.5 TB μεγιστοποιώντας την ανάγκη αξιολόγησης του μοντέλου. Η αποτίμηση των προγνωστικών πεδίων σε σχέση με τις παρατηρήσεις επιφανείας από το Global Telecommunication Network (GTS) πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της ανάπτυξης ενός εξελιγμένου στατιστικού πακέτου. Το λογισμικό που αναπτύχθηκε περιλαμβάνει αποκωδικοποιητές grib, εξελιγμένα σχήματα ελέγχου της ποιότητας των παρατηρήσεων και υπολογισμό διάφορων στατιστικών δεικτών όπως το συστηματικό σφάλμα (bias) και η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) τόσο για συνεχείς όσο και για διακριτές μεταβλητές. Στη συγκεκριμένη εργασία, προγνώσεις από το μοντέλο WRF συγκρίνονται με παρατηρήσεις από 935 μετεωρολογικούς σταθμούς επιφανείας ανομοιόμορφα κατανομημένους στο πεδίο ολοκλήρωσης. Η πίεση στη μέση στάθμη θάλασσας, η θερμοκρασία στα 2 μέτρα και η ένταση του ανέμου στα 10 μέτρα αξιολογούνται με σκοπό την εκτίμηση των παραπάνω στατιστικών δεικτών και τελικά τη διερεύνηση της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου υπό το καθεστώς διαφορετικών συνοπτικών συνθηκών.

STATISTICAL EVALUATION OF THE HAROKOPIO UNIVERSITY ATMOSPHERIC MODEL FORECASTS

Gkikas Nikolaos¹, Ilias Mavromatidis¹, Anastasios Papadopoulos² & Petros Katsafados¹

¹ Harokopio University of Athens, Department of Geography

² Hellenic Centre for Marine Research, Institute of Inland Waters

Abstract

Since January 2008, the non-hydrostatic limited area model WRF has been installed and appropriately configured in the parallel computing infrastructure of the Department of Geography at Harokopio University of Athens producing high resolution weather forecasts. The model products in a gridded form cover the entire Mediterranean and Black Sea providing forecasts up to 120 hours (5 days). After 2 years of continuous operational mode on a daily basis a valuable database has been produced exceeding 1.5 TB of meteorological variables and maximizing the need for model evaluation. The assessment of the model forecasts against the surface observations from the Global Telecommunication Network (GTS) was fulfilled in the framework of the development of an advanced statistical package. This new developed software includes grib decoders, advanced schemes for the surface observations quality control and estimation of various statistical scores such as bias and root mean square error (RMSE) for both continuous and discrete meteorological variables. In this study,

forecasts from WRF model are verified against the records from 935 surface meteorological stations unevenly distributed over the domain of integration. Mean sea level pressure, temperature at 2 meters and the wind speed at 10 meters are evaluated in order to estimate the above mentioned statistical scores and finally to investigate the forecasting skill of the model under different synoptic conditions.

Λέξεις κλειδιά: Ατμοσφαιρικό μοντέλο, στατιστική αξιολόγηση, αριθμητική πρόγνωση.

Key Words: Atmospheric Model, Statistical Evaluation, Numerical Weather Prediction

1. Εισαγωγή

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις στην ατμόσφαιρα παράγουν σφάλματα κατά την πρόγνωση συγκεκριμένων μετεωρολογικών παραμέτρων, κυρίως κοντά στην επιφάνεια. Προγνωστικές αστοχίες μπορούν να αποδοθούν από την εισαγωγή σφαλμάτων στις οριακές συνθήκες, στην ελλιπή περιγραφή της αρχικής κατάστασης (analysis), ή στην ομαλοποίηση των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών του πεδίου ολοκλήρωσης. Για παράδειγμα, η αναμενόμενη υποεκτίμηση στην ταχύτητα του ανέμου, μπορεί να αποδοθεί στην ελλιπή περιγραφή της τοπογραφίας του πεδίου ολοκλήρωσης (Galanis et al., 2006). Πρόσφατες μελέτες έχουν αναδείξει μία διαφορετική προγνωστική συμπεριφορά του μοντέλου WRF (Roux et al., 2009). Ειδικότερα, το συγκεκριμένο μοντέλο εμφανίζει τάση για υπερεκτίμηση της έντασης του ανέμου ανεξάρτητα του τρόπου περιγραφής του αναγλύφου και της κατανομής ξηράς-θάλασσας. Εν τέλει όμως, η χαοτική φύση της ατμόσφαιρας, ακόμα και στην περίπτωση ενός τέλει μοντέλου, τέλειων παρατηρήσεων και περιγραφής των αρχικών συνθηκών, θέτει ένα όριο στην προγνωστική ικανότητα των αριθμητικών μοντέλων (Katsafados, 2003). Συνεπώς, θα πρέπει να αναμένεται, μείωση της προγνωστικής ικανότητας, όσο αυξάνονται οι προγνωστικές ώρες.

Η στατιστική επαλήθευση της ποιότητας των προγνώσεων είναι πρωταρχικής σημασίας, καθώς η εξέλιξη των αριθμητικών μοντέλων είναι διαρκής επιτυγχάνοντας προσομοιώσεις φαινομένων που εμπίπτουν σε μία ευρεία κλίμακα κινήσεων στην ατμόσφαιρα (από συνοπτική κλίμακα μέχρι meso-β και meso-γ). Το αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης WRF, έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές εφαρμογές, τόσο στη μετεωρολογία όσο και στην υδρολογία, σε διάφορες αναλύσεις, ενώ οι προγνώσεις του έχουν αξιολογηθεί από πλήθος ερευνητικών ομάδων και για διάφορες περιοχές του πλανήτη (Roux et al., 2009, Gozzini et al. 2009 κτλ).

Η συγκεκριμένη εργασία αποσκοπεί στην στατιστική αξιολόγηση των προγνώσεων του μη υδροστατικού αριθμητικού μοντέλου WRF-NMM με βάση τις παρατηρήσεις από μετεωρολογικούς σταθμούς επιφανείας ανομοιογενώς κατανομημένους στο πεδίο ολοκλήρωσης. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε κατάλληλη μεθοδολογία και λογισμικό που περιλαμβάνει τον υπολογισμό των προγνώσεων του μοντέλου στις θέσεις των σταθμών επιφανείας, τον ποιοτικό έλεγχο των μετρήσεων και την εκτίμηση των στατιστικών δεικτών (Wilks, 1995). Τα στατιστικά μεγέθη που θα εξεταστούν είναι η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error) καθώς και το συστηματικό σφάλμα (bias) για κάθε μήνα ξεχωριστά, αλλά και συνολικά για την περίοδο από τον Αύγουστο του 2008 έως και τον Δεκέμβριο του 2009 (17 μήνες). Σκοπός είναι να διαπιστωθεί η χρονική εξέλιξη των δύο κατηγοριών σφαλμάτων ανά μήνα, και επιπλέον να εξεταστεί τυχόν εποχικότητά τους, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των μηνών σε σχέση με την συνολική εκτίμηση. Μέσα από αυτή τη διαδικασία, αναμένεται να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την προγνωστική συμπεριφορά του μοντέλου και για το σύνολο του πεδίου ολοκλήρωσης, το οποίο περιλαμβάνει ένα μεγάλο εύρος κλιματικών περιοχών και σημαντικά ανομοιογενή φυσιογραφικά χαρακτηριστικά.

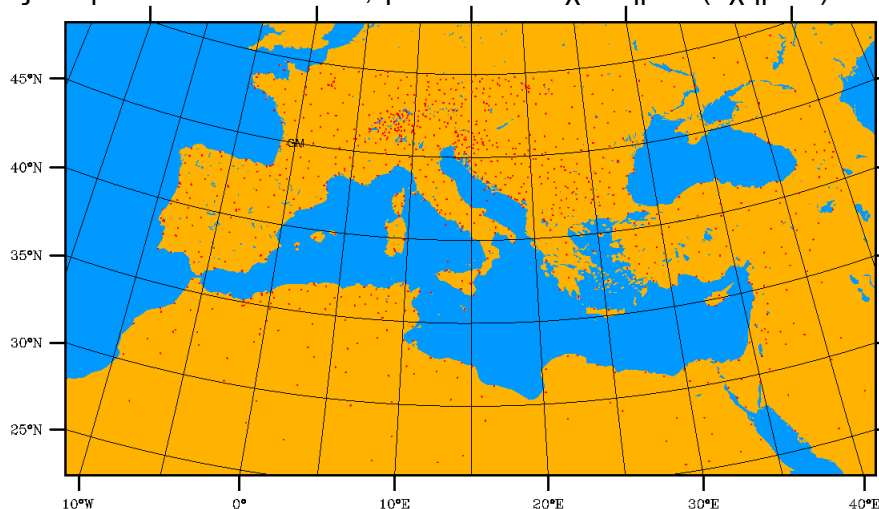
2. Χαρακτηριστικά του μοντέλου

Όπως έχει αναφερθεί το μοντέλο WRF με τον δυναμικό πυρήνα NMM (Janjic et al., 2001) έχει εγκατασταθεί στις υπολογιστικές υποδομές του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου Αθηνών (ΧΠΑ) από τον Ιανουάριο του 2008 παρέχοντας πρόγνωση καιρού σε χρονικό εύρος 120 ωρών (5 ημερών). Η πρόγνωση εκτελείται σε πεδίο ολοκλήρωσης 305x273 σημείων πλέγματος, που καλύπτει το

κεντρικό και νότιο τμήμα της Ευρώπης, τη Μεσογειακή λεκάνη και τμήμα της Βορείου Αφρικής, με $0.09^{\circ} \times 0.09^{\circ}$ οριζόντια ανάλυση (~ 10 km), χρονικό βήμα ολοκλήρωσης 24sec και 38 κατακόρυφα επίπεδα μέχρι τα 25 mb. Για την μικροφυσική χρησιμοποιείται το σχήμα Ferrier ενώ το ισοζύγιο ακτινοβολιών παραμετροποιείται με το σχήμα GFDL. Το σχήμα Betts-Miller-Janjic χρησιμοποιείται για τις διεργασίες των νεφών και βροχόπτωσης (Janjic et al., 2001). Η φυσική του επιφανειακού στρώματος παραμετροποιείται με το σχήμα Monin-Obukhov-Janjic. Για την τυρβώδη κινητική ενέργεια του πλανητικού οριακού στρώματος χρησιμοποιείται το σχήμα Mellor-Yamada-Janjic και υπομοντέλο εδάφους είναι το ενοποιημένο NOAH (Chen and Dudhia 2001). Τέλος, για την τοπογραφία χρησιμοποιείται η βάση δεδομένων USGS DEM (30x30sec), για τη χρήση γης 24 κατηγορίες του USGS (30x30sec) και για το είδος εδάφους οι 16 κατηγορίες του FAO ($30^{\circ} \times 30^{\circ}$). Για την επιφανειακή θερμοκρασία θάλασσας, χρησιμοποιούνται τα real-time-global (rtg) δεδομένα σε $0.083^{\circ} \times 0.083^{\circ}$ ανάλυση. Οι αρχικές και οριακές συνθήκες προέρχονται από τον προγνωστικό κύκλο 12:00UTC του παγκόσμιου προγνωστικού συστήματος GFS/NCEP σε ανάλυση $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$. Για την επιχειρησιακή λειτουργία του μοντέλου σε καθημερινή βάση έχουν αναπτυχθεί κατάλληλοι αλγόριθμοι προεπεξεργασίας των αρχικών και οριακών συνθηκών καθώς και μετεπεξεργασίας των αποτελεσμάτων και οπτικοποίησής τους. Έχει επίσης αναπτυχθεί λογισμικό βέλτιστης διαχείρισης του όγκου των αποτελεσμάτων που σε καθημερινή βάση ανέρχεται σε 1,5 GB. Ο μεγάλος όγκος δεδομένων σε συνδυασμό με τον περιορισμένο αποθηκευτικό χώρο στην αρχική φάση της επιχειρησιακής λειτουργίας έχει επιτρέψει την αποθήκευση προγνωστικών δεδομένων από τον Αύγουστο του 2008 μέχρι σήμερα.

3. Ανάπτυξη Μεθοδολογίας

Η αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου πραγματοποιήθηκε συγκρίνοντας μία προς μία τις μετρήσεις 935 μετεωρολογικών σταθμών επιφανείας 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, για τα αντίστοιχα σημεία (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Πεδίο ολοκλήρωσης του μοντέλου WRF-NMM. Με τα σημεία κόκκινου χρώματος αποτυπώνονται οι θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών.

Καθώς τα σημεία πλέγματος του πεδίου ολοκλήρωσης του μοντέλου συνήθως δεν συμπίπτουν με τις ακριβείς θέσεις των σταθμών, χρησιμοποιήθηκε το κοντινότερο προς το σταθμό σημείο του πλέγματος, ώστε να εξαχθούν οι αντίστοιχες προγνωστικές τιμές. Στη διαδικασία συλλογής των επιφανειακών μετρήσεων, εντάσσεται ο ποιοτικός έλεγχος και η συστηματοποίηση αυτών, αφ'ενός για εμφανώς λανθασμένες ή απύσους τιμές, και αφ'ετέρου για τιμές ασύμβατες με τις προγνωστικές ώρες του συστήματος. Αυτό αρχικά πραγματοποιήθηκε αφαιρώντας τους σταθμούς των οποίων το κοντινότερο γειτονικό σημείο του πλέγματος δεν συνέπιπτε με την θεωρούμενη ως ξηρά από το

μοντέλο, και στη συνέχεια ελέγχοντας εξ αρχής την απόκλιση των μετρήσεων των υπολοίπων σταθμών, σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές του μοντέλου πρόγνωσης. Στην αξιολόγηση, δεν ελήφθησαν υπόψιν σταθμοί, οι τιμές των οποίων συστηματικά μία, ή περισσότερες μετεωρολογικές παράμετροι αναφέρονταν λανθασμένα, ενώ από τις μετρήσεις των υπολοίπων δεν ελήφθησαν υπόψιν αυτές, οι οποίες ξεπέρασαν κάποια συγκεκριμένα όρια, τα οποία και θεωρήθηκαν τα ανώτατα επιτρεπτά όρια σφάλματος (ώστε να αποκλειστούν και άλλα τυχαία σφάλματα στις μετρήσεις). Τέλος, η ανάλυση αυτή πραγματοποιήθηκε για τις πρώτες 72 προγνωστικές ώρες του συστήματος, προκειμένου να διαπιστωθεί η χρονική εξέλιξη της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου.

Σχετικά με τις συνεχείς στο χώρο μετεωρολογικές παραμέτρους της θερμοκρασίας, της ταχύτητας του ανέμου και της ατμοσφαιρικής πίεσης στη ΜΣΘ, οι στατιστικοί δείκτες της τετραγωνικής ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error, RMSE), και το συστηματικό σφάλμα (bias), χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για την ποιότητα των προγνώσεων του μοντέλου. Το συστηματικό σφάλμα (bias) δίνεται από τον τύπο:

$$bias = \frac{\sum(F-O)}{T} \quad (1)$$

ενώ η σχέση με την οποία υπολογίζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι:

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

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 (2), είναι ένας από τους πλέον διαδεδομένους για την εκτίμηση της ακρίβειας και λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0, +\infty)$. Τέλεια προγνωστικά πεδία, προσεγγίζουν την τιμή μηδέν (Katsafados, 2003).

Οι στατιστικοί δείκτες που προκύπτουν από τις ανωτέρω σχέσεις, μπορούν να οδηγήσουν σε ασφαλέστερα συμπεράσματα που σχετίζονται με την απόκλιση των προγνώσεων σε συνάρτηση με τις πραγματικές τιμές, μόνο εάν χρησιμοποιηθούν συνδυαστικά σε σχέση με τη κάθε εξεταζόμενη μεταβλητή. Επίσης, οι συγκεκριμένοι δείκτες υπολογίστηκαν για κάθε μήνα ξεχωριστά, από τον Αύγουστο του 2008 έως και το Δεκέμβριο του 2009, αλλά και σε όλο στο προαναφερθέν διάστημα, ώστε να διαπιστωθεί η συνολική απόδοση του προγνωστικού μοντέλου.

4. Ανάλυση Αποτελεσμάτων

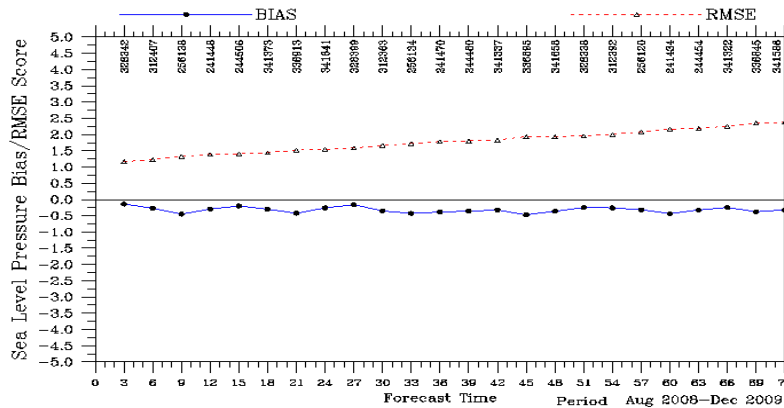
4.1 Συνολική Εικόνα

Τα στατιστικά μεγέθη RMSE και bias έχουν εκτιμηθεί για το σύνολο της υπό εξέταση περιόδου (Αύγουστος 2008-Δεκέμβριος 2009) καθώς και για το σύνολο των σταθμών επιφανείας και αφορούν την πίεση στη Μέση Στάθμη Θάλασσας (ΜΣΘ), της θερμοκρασίας στα 2 μέτρα και της έντασης του ανέμου στα 10 μέτρα. Σχετικά με την ατμοσφαιρική πίεση (Σχήμα 2α), η σταδιακή αύξηση του προγνωστικού σφάλματος υποδηλώνει ισχυρή χρονική εξάρτηση της προγνωστικότητας του συγκεκριμένου πεδίου και συνδυάζεται με περιορισμένη υποεκτίμηση μέχρι 0.5 hPa στο σύνολο της προγνωστικής περιόδου.

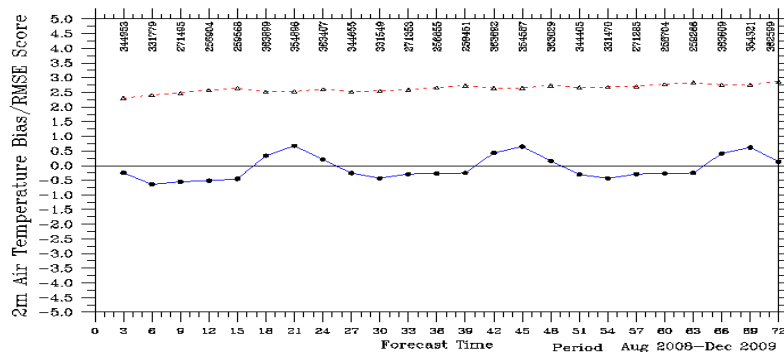
Το προγνωστικό σφάλμα της θερμοκρασίας στα 2 μέτρα, δείχνει περιορισμένη εξάρτηση από τον χρόνο και κυμαίνεται από 2.5 έως 3 (°C), για το σύνολο της περιόδου, ενώ το bias εμφανίζει αξιοσημείωτη περιοδικότητα με την υποεκτίμηση των νυχτερινών ωρών να μετατρέπεται σε υπερεκτίμηση τις πρωινές και μεσημβρινές ώρες (Σχήμα 2β). Η συγκεκριμένη συμπεριφορά

θεωρείται αναμενόμενη και μπορεί να αποδοθεί κυρίως στην αρχικοποίηση και λειτουργία του υπομοντέλου εδάφους καθώς και στη διαχείριση των επιφανειακών ροών θερμότητας. Στην περίπτωση της έντασης του ανέμου στα 10 μέτρα εντοπίζεται συστηματική υπερεκτίμηση στο σύνολο της προγνωστικής περιόδου η οποία λαμβάνει μέγιστες τιμές κατά τις νυχτερινές ώρες. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά μπορεί να αποδοθεί στην σχετικά ελλιπή περιγραφή της εξασθένησης των θερμικών αιτίων που μπορεί να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση της έντασης κατά τη θερινή περίοδο, αλλά και στο υψόμετρο των σταθμών παρατηρήσεων, το οποίο είναι κατά μέσο όρο κάτω από 700 μέτρα, και το οποίο έχει διαπιστωθεί ότι αυξάνει το σφάλμα (Roux et al. 2009).

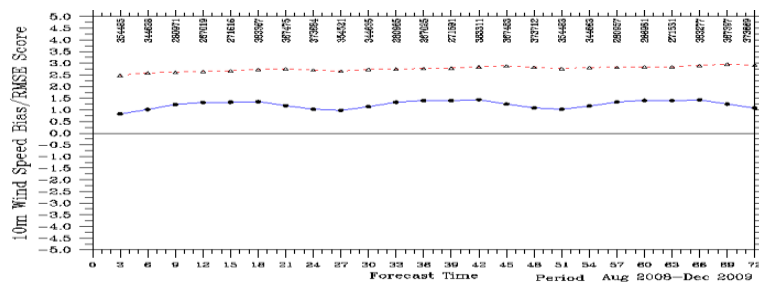
α)



β)



γ)

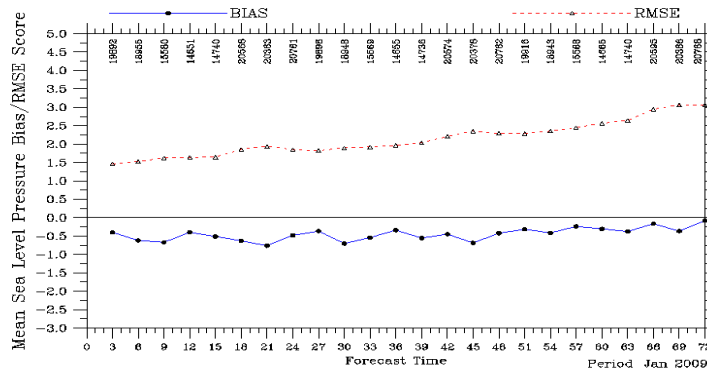


Σχήμα 2: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) και bias (μπλε συνεχής γραμμή) (α) της ατμοσφαιρικής πίεσης στη ΜΣΘ σε hPa, (β) της θερμοκρασίας στα 2m σε °C και (γ) και ταχύτητας ανέμου στα 10m σε m/s για το σύνολο του εξεταζόμενου διαστήματος. Στον κάτω οριζόντιο άξονα αποτυπώνονται οι προγνωστικές ώρες ενώ στον άνω άξονα εμφανίζεται ο δειγματικός χώρος (πλήθος των ζευγών σύγκρισης).

4.2 Εποχιακή κύμανση

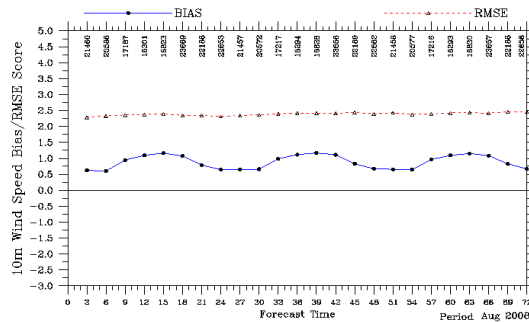
4.2.1 Ατμοσφαιρική πίεση στη ΜΣΘ

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εποχιακή κύμανση των εξεταζόμενων δεικτών σφάλματος καθώς η ακρίβεια πρόγνωσης στα εξεταζόμενα πεδία, διαφοροποιείται από μήνα σε μήνα. Όσον αφορά την ατμοσφαιρική πίεση στην ΜΣΘ, η κατά μέσο όρο απόκλιση σε σχέση με τις παρατηρηθείσες τιμές ήταν σχεδόν μηδενική, στους θερινούς μήνες με ελαφρά μείωση της ακρίβειας στο τέλος του προγνωστικού οριζόντια δείχνοντας συμπεριφορά αντίστοιχη με το σχήμα 2α.



Σχήμα 3: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών *RMSE* (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) και *bias* (μπλε συνεχής γραμμή) της ατμοσφαιρικής πίεσης στη ΜΣΘ σε hpa, για τον τον Ιανουάριο του 2009. Στον κάτω οριζόντιο άξονα αποτυπώνονται οι προγνωστικές ώρες ενώ στον άνω άξονα εμφανίζεται ο δειγματικός χώρος (πλήθος των ζευγών σύγκρισης).

Αντίθετα, κατά τη χειμερινή περίοδο, εμφανίζεται συστηματική υποεκτίμηση (0.5 έως 1hra), αλλά με σημαντική αύξηση του σφάλματος έως και τις 72 ώρες (Σχήμα 3). Σε αυτό φαίνεται να συντελεί το γεγονός ότι, κατά τη χειμερινή περίοδο η κινητικότητα των ατμοσφαιρικών διαταραχών στο βόρειο ημισφαίριο είναι πολύ μεγαλύτερη (μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης υφέσεων), αυξάνοντας παράλληλα και την ασάφεια της πρόγνωσης, το οποίο αποτυπώνεται στον δείκτη *RMSE*.



Σχήμα 4: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών *RMSE* (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) και *bias* (μπλε συνεχής γραμμή) της ταχύτητας του ανέμου στα 10 μέτρα σε m/s, για τον Αύγουστο του 2008. Στον κάτω οριζόντιο άξονα αποτυπώνονται οι προγνωστικές ώρες ενώ στον άνω άξονα εμφανίζεται ο δειγματικός χώρος (πλήθος των ζευγών σύγκρισης).

4.2.2. Ταχύτητα ανέμου στα 10m

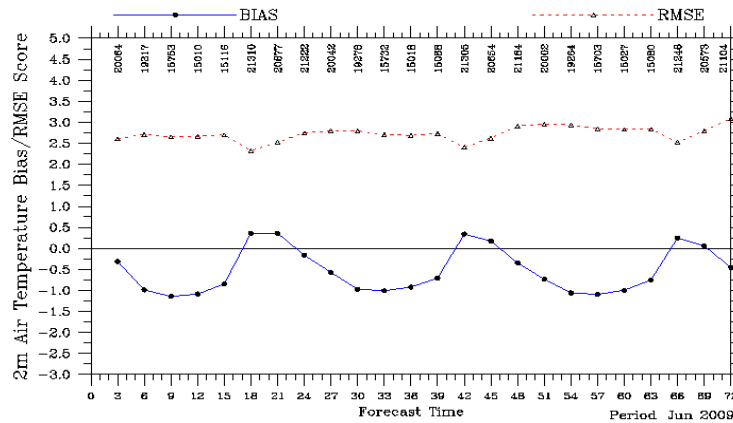
Το συγκεκριμένο προγνωστικό πεδίο υπερεκτιμάται σε όλους τους επιμέρους μήνες της εξεταζόμενης περιόδου. Εντούτοις η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος λαμβάνει μικρότερες τιμές κατά την θερινή περίοδο (~2.5 m/s), σε σχέση με τη χειμερινή περίοδο (ξεπερνάει τα 3m/s σε κάποιες περιπτώσεις). Με βάση το Σχήμα 4 το μοντέλο αναπαριστά ικανοποιητικά τις θερμικές κυκλοφορίες (θαλάσσια αύρα) που αναπτύσσονται κατά την περίοδο της

μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας ενώ φαίνεται να υπερεκτιμά τις νυχτερινές ροές κυκλοφορίας.

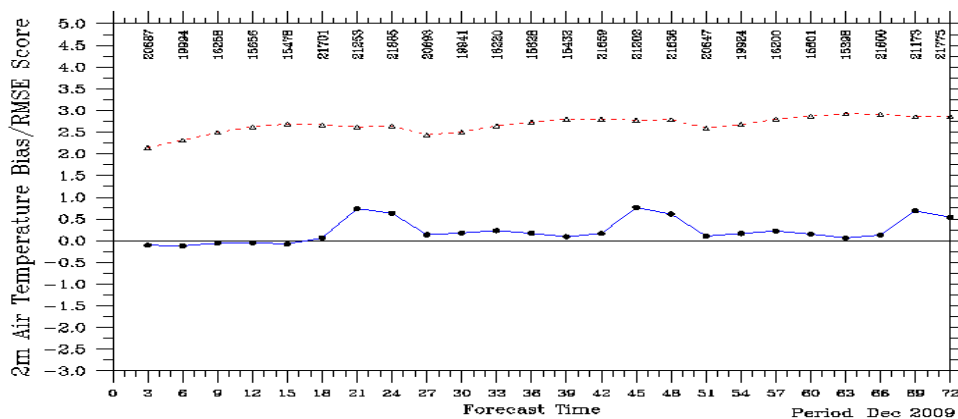
4.2.3 Θερμοκρασία στα 2 μέτρα

Αρκετές διαφοροποιήσεις παρατηρούνται στο πλαίσιο μιας συνολικής εξέτασης της εξέλιξης της συμπεριφοράς των δύο εξεταζόμενων στατιστικών δεικτών μέσα στο έτος. Η συμπεριφορά του συστηματικού σφάλματος της θερμοκρασίας είναι αναμενόμενη εμφανίζοντας ημερήσια διακύμανση η οποία είναι πιο σημαντική τους θερινούς μήνες. Ειδικότερα την περίοδο μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας (Σχήμα 5α) παρουσιάζεται συστηματική υποεκτίμηση των ελαχίστων θερμοκρασιών γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στο πιθανό έλλειμμα υγρασίας στο έδαφος το οποίο εμφανίζεται πιο σημαντικό τη θερινή περίοδο με αποτέλεσμα την περαιτέρω ψύξη του εδάφους κατά τις νυχτερινές ώρες.

α)



β)



Σχήμα 5: Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) και bias (μπλε συνεχής γραμμή) της θερμοκρασίας στα 2μ σε °C, για (α) τον Ιούνιο του 2009 και (β) το Δεκέμβριο του 2009. Στον κάτω οριζόντιο άξονα αποτυπώνονται οι προγνωστικές ώρες ενώ στον άνω άξονα εμφανίζεται ο δειγματικός χώρος (πλήθος των ζευγών σύγκρισης).

Συνολικά εντοπίζονται 2 βασικές κατηγορίες συμπεριφοράς στο σφάλμα κατά τη διάρκεια των εξεταζόμενων μηνών. Τους μήνες με τη μεγαλύτερη διάρκεια ημέρας, κατά τους οποίους υπάρχει μια συνολική υποεκτίμηση των θερμοκρασιών και στους μήνες με τη μεγαλύτερη διάρκεια νύχτας, όπου εμφανίζεται συνολική περιορισμένη υπερεκτίμηση. Επιπροσθέτως το RMSE, δεν παρουσιάζει ουσιαστικές διαφοροποιήσεις μεταξύ θερινών και χειμερινών μηνών, παρόλο που το bias φαίνεται να έχει πιο σταθερή συμπεριφορά στον χρονικό ορίζοντα της πρόγνωσης.

5. Συμπεράσματα – μελλοντική έρευνα

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης έρευνας αναπτύχθηκε κατάλληλη μεθοδολογία και λογισμικό για την στατιστική αξιολόγηση των προγνώσεων του μη υδροστατικού αριθμητικού μοντέλου WRF-NMM. Με βάση τους στατιστικούς δείκτες το μοντέλο παρουσιάζει ικανοποιητική προγνωστική συμπεριφορά για την ατμοσφαιρική πίεση στη ΜΣΘ, τη θερμοκρασία στα 2 μέτρα και την ένταση του ανέμου στα 10 μέτρα για το σύνολο της περιόδου αξιολόγησης (Αύγουστος 2008-Δεκέμβριος 2009).

Η ατμοσφαιρική πίεση στη ΜΣΘ παρουσιάζει σταδιακή αύξηση του προγνωστικού σφάλματος με το χρόνο και συνδυάζεται με περιορισμένη υποεκτίμηση μέχρι 0.5 hPa στο σύνολο της προγνωστικής περιόδου. Οι χαμηλότερες τιμές του προγνωστικού σφάλματος που προέκυψαν για την θερινή περίοδο, μπορούν εν μέρει να αποδοθούν στην εξασθένηση της μεταβλητότητας της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, αυτήν την περίοδο σε σχέση με τους χειμερινούς μήνες. Σχετικά με το πεδίο της θερμοκρασίας, το προγνωστικό σφάλμα διατηρείται σε αναμενόμενες και αποδεκτές τιμές ενώ παρουσιάζεται συστηματική υποεκτίμηση των ελαχίστων θερμοκρασιών κατά τη θερμή περίοδο γεγονός που μπορεί να αποδοθεί σε πιθανό έλλειμμα υγρασίας στο έδαφος από τις αρχικές συνθήκες ή από τη λειτουργία του υπομοντέλου εδάφους. Τέλος, συστηματική υπερεκτίμηση, παρατηρείται στην ένταση του ανέμου, κάτι που διαπιστώνεται και σε πλήθος άλλων ανάλογων εργασιών.

Ως στόχος μελλοντικής έρευνας μπορεί να τεθεί η αξιολόγηση και άλλων μετεωρολογικών παραμέτρων, όπως η διεύθυνση του ανέμου, και η βροχόπτωση, αλλά και προγνωστικών πεδίων ανώτερης ατμόσφαιρας. Η χωρική κατανομή των σφαλμάτων, παρουσιάζει επίσης μεγάλο ενδιαφέρον και αξίζει να μελετηθεί, τόσο για να διαπιστωθεί βάσει των επιφανειακών μετρήσεων, ποιές περιοχές εμφανίζουν τους μικρότερους ή μεγαλύτερους δείκτες σφάλματος, αλλά και να αναδείξει τα κοινά χαρακτηριστικά τους.

Βιβλιογραφία

- Chen, F., and J. Dudhia, 2001: Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*. **129** (4), 569-585.
- Galanis G., Louka P., Katsafados P., Kallos G., Pytharoulis I., 2006: Applications of Kalman filters based on non linear functions to numerical weather predictions, *Annales Geophysicae*, **24**, 2451–2460.
- 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 June 2008.
- Janjic ZI, Gerrity JP and Nickovic S., 2001: An Alternative Approach to Nonhydrostatic Modeling. *Monthly Weather Review*. **129**, 1164-1178.
- Katsafados P, 2003: *Factors and parameterizations contributing the medium range forecast skill of limited area models*. PhD Dissertation, Department of Physics, University of Athens (in Greek).
- Papadopoulos A., 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.
- 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, 23-27 June 2008.
- Wilks, DS, 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Academic Press, 233-242.