

Γεωγραφίες

Αρ. 20 (2012)

Γεωγραφίες, Τεύχος 20, 2012

ΕΞΑΜΗΝΙΑΙΑ ΕΚΔΟΣΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ

ΓΕΩΓΡΑΦΙΕΣ

ΦΘΙΝΟΠΩΡΟ 2012 - ΤΕΥΧΟΣ 20



ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΚΑΙΡΟΥ ΤΟΥ ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΓΝΩΣΕΩΝ

*Πέτρος Κατσαφάδος, Ηλίας Μαυροματίδης,
Νικόλαος Γκίκας, Αναστάσιος Παπαδόπουλος*

ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΚΑΙΡΟΥ ΤΟΥ ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΓΝΩΣΕΩΝ

Πέτρος Κατσαφάδος,¹ Ηλίας Μαυροματίδης,² Νικόλαος Γκίκας,³ Αναστάσιος Παπαδόπουλος⁴

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Από τον Ιανουάριο του 2008, το Τμήμα Γεωγραφίας του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου Αθηνών παρέχει μέσω της ιστοσελίδας <http://meteo-clima.gr> αναλυτική πρόγνωση καιρού 5 ημερών για την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου και της Μαύρης Θάλασσας. Η πρόγνωση βασίζεται στο μη υδροστατικό μοντέλο περιορισμένης περιοχής WRF το οποίο εγκαταστάθηκε και προσαρμόστηκε κατάλληλα στην παράλληλη υπολογιστική υποδομή του τμήματος. Μετά από 2 έτη συνεχούς επιχειρησιακής λειτουργίας σε καθημερινή βάση έχει δημιουργηθεί σημαντική βάση μετεωρολογικών πλεγματικών δεδομένων που υπερβαίνει τα 2 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 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. Στη συγκεκριμένη εργασία, προγνώσεις από το μοντέλο WRF συγκρίνονται με παρατηρήσεις από 935 μετεωρολογικούς σταθμούς επιφανείας ανομοιόμορφα κατανεμημένους στο πεδίο ολοκλήρωσης. Η πίεση στη μέση στάθμη θάλασσας, η θερμοκρασία στα 2 μ., η ένταση του ανέμου στα 10 μ. και ο αθροιστικός υετός δώρου αξιολογούνται με σκοπό την εκτίμηση των παραπάνω στατιστικών δεικτών και, τελικά, τη διερεύνηση της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου υπό το καθεστώς διαφορετικών συνοπτικών συνθηκών.

The numerical weather prediction system of Harokopio University and Statistical Evaluation of the forecasts

Petros Katsafados, Ilias Mavromatidis, Nikolaos Gkikas, Anastasios Papadopoulos

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 implementation on a daily basis, a valuable database has been produced, exceeding 2 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. The fields of the mean sea level pressure, temperature at 2 meters, the wind speed at 10 meters and the 6-hour accumulated precipitation 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.

1 Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωγραφίας.

2 Ινστιτούτο Εσωτερικών Υδάτων, Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών.

3 Φοιτητής του Τμήματος Γεωγραφίας του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου.

4 Ερευνητής Β' στο Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών.

Εισαγωγή

Επιχειρησιακά συστήματα πρόγνωσης καιρού σε τοπική κλίμακα λειτουργούν στον ελλαδικό χώρο για περισσότερο από μία δεκαετία. Το σύστημα Skiron/Eta του Πανεπιστημίου Αθηνών ξεκίνησε να λειτουργεί σε καθημερινή βάση το 1997, παρέχοντας προγνώσεις για την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου σε οριζόντια ανάλυση $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ και με χρονικό ορίζοντα πρόγνωσης τις 72 ώρες (Kallos κ.ά. 1997). Δύο χρόνια αργότερα, το 1999, στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού προγράμματος POSEIDON εγκαταστάθηκε το ομώνυμο σύστημα πρόγνωσης καιρού στις παράλληλες υπολογιστικές εγκαταστάσεις του Ελληνικού Κέντρου Θαλάσσιων Ερευνών. Το συγκεκριμένο σύστημα βασίζεται στο ατμοσφαιρικό μοντέλο Skiron/Eta με σημαντικές τροποποιήσεις στην παραμετροποίηση του επιφανειακού υποστρώματος για την ακριβέστερη εκτίμηση του ανέμου πάνω από θαλάσσιες επιφάνειες (Paradopoulos κ.ά. 2002). Από το 2008 και στο πλαίσιο του προγράμματος POSEIDON II, το σύστημα έχει αναβαθμιστεί με τη μη υδροστατική έκδοση του μοντέλου, παρέχοντας πλέον προγνώσεις σε οριζόντιο πλέγμα $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ και χρονικό ορίζοντα 120 ωρών (Paradopoulos και Katsafados 2009). Αντίστοιχα συστήματα πρόγνωσης καιρού, βασισμένα σε διάφορα προγνωστικά μοντέλα, έχουν εγκατασταθεί στο Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών και το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Η Ομάδα Δυναμικής της Ατμόσφαιρας και του Κλίματος (ΟΔΑΚ) του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου Αθηνών (ΧΠΑ), ακολουθώντας τη σύγχρονη τάση ανάπτυξης δυναμικών προσομοιώσεων σε υπερ-υπολογιστικά συστήματα, έχει εγκαταστήσει και προσαρμόσει το μη υδροστατικό μοντέλο WRF με τον δυναμικό πυρήνα NMM στις υπολογιστικές εγκαταστάσεις του Τμήματος Γεωγραφίας. 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 εκτεταμένη περίοδο δοκιμών και αρχικών 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 (5 ημέρες). Μετά από 2 έτη συνεχούς επιχειρησιακής λειτουργίας σε καθημερινή βάση έχει δημιουργηθεί σημαντική βάση μετεωρολογικών πλεγματικών δεδομένων που υπερβαίνει τα 2 TB καθιστώντας απαραίτητη τη διαδικασία συστηματικής αξιολόγησης του μοντέλου.

Η στατιστική επαλήθευση της ποιότητας των προγνώσεων θεωρείται 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). Όμως, οι αριθμητικές προσομοιώσεις παράγουν σφάλματα κατά την εκτίμηση συγκεκριμένων μετεωρολογικών παραμέτρων, κυρίως κοντά στην επιφάνεια. Προγνωστικές αστοχίες μπορούν να προέλθουν από την εισαγωγή σφαλμάτων στις οριακές συνθήκες, στην ελλιπή περιγραφή της αρχικής κατάστασης (πεδία ανάλυσης), στην παραμετροποίηση μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τις πολύπλοκες διεργασίες που συμβαίνουν στο σύστημα ατμόσφαιρα-έδαφος-θάλασσα ή στην ομαλοποίηση των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών του πεδίου ολοκλήρωσης. Στην εργασία των Galanis κ.ά. (2006) η προκύπτουσα υποεκτίμηση της ταχύτητας του ανέμου στο αριθμητικό μοντέλο Skiron

αποδόθηκε στην ελλιπή περιγραφή της τοπογραφίας του πεδίου ολοκλήρωσης. Πρόσφατες μελέτες έχουν αναδείξει μία διαφορετική προγνωστική συμπεριφορά του μοντέλου WRF (Roux κ.ά. 2009, Gozzini κ.ά. 2009). Ειδικότερα, το συγκεκριμένο μοντέλο εμφανίζει τάση για υπερεκτίμηση της έντασης του ανέμου ανεξάρτητα του τρόπου περιγραφής του αναγλύφου και της κατανομής ξηράς-θάλασσας.

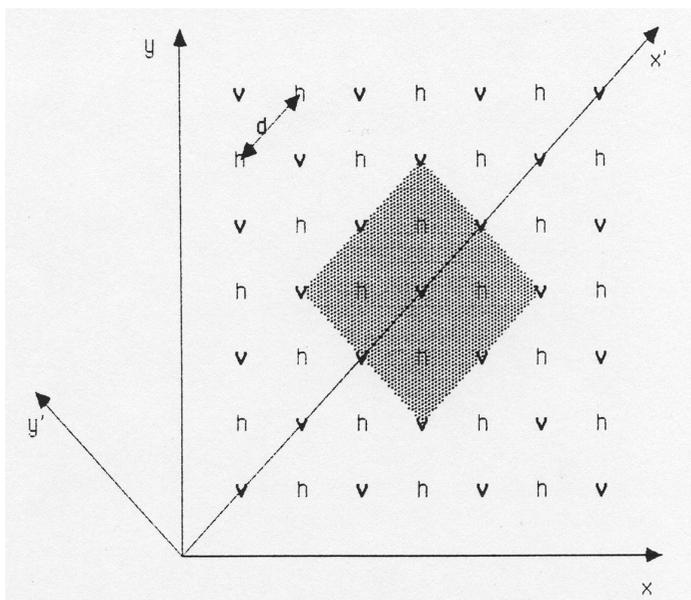
Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του αριθμητικού μοντέλου WRF, οι αρχικές και οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται για την επιχειρησιακή πρόγνωση σε συνδυασμό με τις εφαρμογές του. Το σύνολο των προγνωστικών δεδομένων σε μορφή μετεωρολογικών χαρτών, μετεωγραμμάτων και τεφιγραμμάτων είναι διαθέσιμα σε καθημερινή βάση στην την ιστοσελίδα <http://meteoclina.gr>. Η συγκεκριμένη εργασία αποσκοπεί στη στατιστική αξιολόγηση των προγνώσεων με βάση τις παρατηρήσεις από μετεωρολογικούς σταθμούς επιφανείας ανομοιογενώς χωρικά κατανεμημένους 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 εξετάζονται είναι η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error) καθώς και το συστηματικό σφάλμα (bias) τόσο για τις συνεχείς όσο και για τις διακριτές μεταβλητές σε μηνιαία βάση, αλλά και συνολικά για την περίοδο αξιολόγησης από τον Αύγουστο του 2008 έως και τον Δεκέμβριο του 2009 (17 μήνες). Μέσα από τη συγκεκριμένη διαδικασία, διερευνάται η χρονική εξέλιξη των δύο κατηγοριών σφαλμάτων για το σύνολο του πεδίου ολοκλήρωσης, το οποίο περιλαμβάνει ένα μεγάλο εύρος κλιματικών περιοχών με σημαντικά ανομοιογενή φυσιογραφικά χαρακτηριστικά και με διαφορετικές συνοπτικές συνθήκες.

2. Αρχιτεκτονική του μοντέλου

Το μοντέλο WRF ακολουθεί την υδροστατική προσέγγιση ή τη μη υδροστατική επίλυση και αποτελεί ένα αξιόπιστο σύστημα με αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ για την εκτίμηση ατμοσφαιρικών φαινομένων σε τοπικό επίπεδο (όπως συστήματα κατακόρυφης ανάπτυξης, συνοπτική και υποσυνοπτική κυκλοφορία και φαινόμενα στη meso-α και meso-β χαρακτηριστική κλίμακα κινήσεων). Η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου WRF-NMM εφαρμόζεται στα σημεία semi-staggered πλέγματος τύπου E, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.

Η δυναμική του μοντέλου βασίζεται στον πυρήνα NMM (Non-hydrostatic Mesoscale Model), ενώ τα σχήματα φυσικής που περιλαμβάνει είναι:

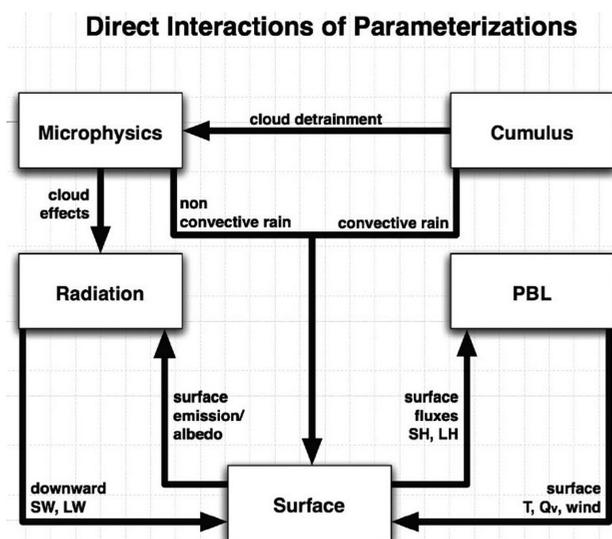
- Για τη μικροφυσική εφαρμόζεται το σχήμα Ferrier (Ferrier κ.ά. 2002).
- Το ισοζύγιο ακτινοβολιών παραμετροποιείται με το σχήμα του Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) των Schwarzkopf και Fels (1991).
- Το σχήμα Betts-Miller-Janjic χρησιμοποιείται για τις διεργασίες των νεφών και βροχόπτωσης (Janjic κ.ά. 2001, Janjic 2003).



Σχήμα 1. Πλέγμα τύπου E σε κύριο (x,y) και δευτερεύον (x',y') σύστημα συντεταγμένων. Η ελάχιστη έκταση τεσσάρων σημείων πλέγματος σημειώνεται με τη σκιασμένη περιοχή. Η απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικά σημεία πλέγματος της ίδιας μεταβλητής απεικονίζεται με d

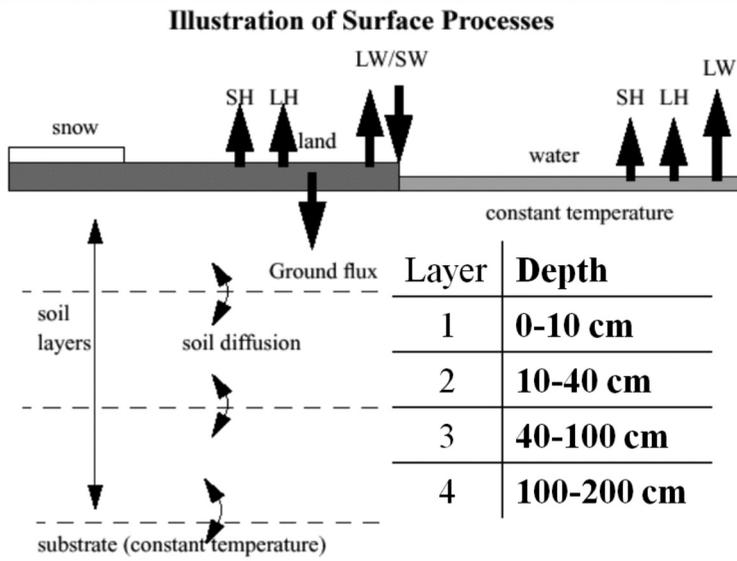
- Η φυσική του επιφανειακού στρώματος παραμετροποιείται με το σχήμα Monin-Obukhov-Janjic (Zilitinkevich 1995).
- Για την τυρβώδη κινητική ενέργεια του πλανητικού οριακού στρώματος χρησιμοποιείται το σχήμα Mellor-Yamada-Janjic (Mellor και Yamada 1982, Janjic 1996).
- Υπομοντέλο εδάφους είναι το ενοποιημένο NOAH (Chen και Dudhia 2001).

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής ανάμεσα στα επιμέρους σχήματα του μοντέλου (Dudhia 2009).



Σχήμα 2. Αλληλεπιδράσεις των παραμετροποιήσεων των επιμέρους σχημάτων του μοντέλου

Ειδικά στο υπομοντέλο εδάφους NOAH υπολογίζεται η επιφανειακή και υπεδάφια απορροή καθώς και οι ροές θερμότητας και υγρασίας σε 4 υπεδάφια στρώματα μέχρι το βάθος των 2 μέτρων (Σχήμα 3).



Σχήμα 3. Οι διεργασίες στο έδαφος από το υπομοντέλο NOAH (Dudhia 2009). Ο πίνακας αναφέρει τα πάχη για τα 4 υπεδάφια στρώματα του μοντέλου

Με βάση το σχήμα NOAH (Chen και Dudhia 2001) η εκτίμηση της περιεκτικότητας του εδάφους σε υγρασία (θ σε μονάδες $m^3 m^{-3}$) προκύπτει:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial z} + F_{\theta} \quad (2.1)$$

όπου η διάχυση του νερού στο έδαφος (D σε μονάδες $m^2 s^{-1}$) και η υδραυλική αγωγιμότητα (K σε μονάδες $m s^{-1}$) αποτελούν συναρτήσεις του θ ενώ F_{θ} αντιστοιχεί στις πηγές και καταβόθρες του εδαφικού νερού (υετίσιμο νερό, εξάτμιση και απορροή). Η επιφανειακή απορροή δίνεται $R = P_d - I_{max}$, όπου P_d ο υετός που δεν συγκρατείται από τη βλάστηση και I_{max} η μέγιστη διήθηση του νερού στο έδαφος η οποία υπολογίζεται:

$$I_{max} = P_d \frac{D_x [1 - \exp(-kdt\delta_i)]}{P_d + D_x [1 - \exp(-kdt\delta_i)]} \quad (2.2)$$

$$\text{όπου } D_x = \sum_{i=1}^4 \Delta Z_i (\Theta_s - \Theta_i) \quad kdt = kdt_{ref} \frac{K_s}{K_{ref}} \quad (2.3)$$

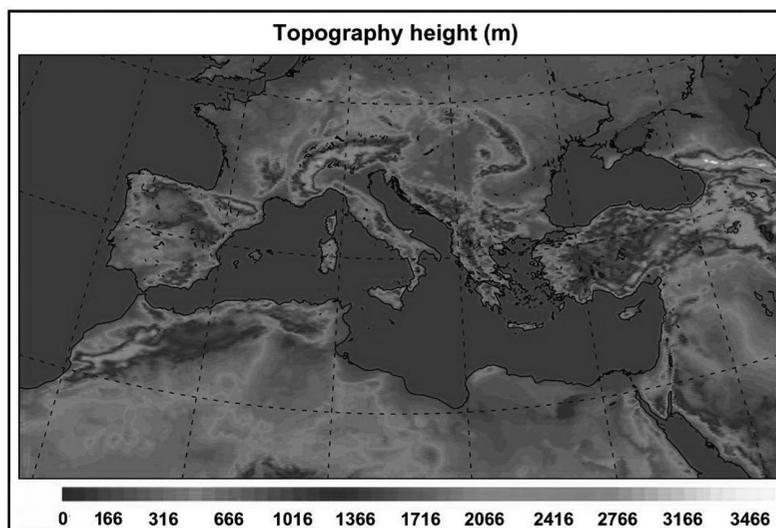
δ_i είναι το χρονικό βήμα ολοκλήρωσης του μοντέλου (s), ΔZ_i το i -στό πάχος υπεδάφιου στρώματος (m), K_s η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού ($m s^{-1}$) και $Kdt_{ref} = 3.0$ και $K_{ref} = 2 \times 10^{-6} m s^{-1}$ σταθερές.

2. Διαμόρφωση της επιχειρησιακής λειτουργίας και προγνωστικά προϊόντα

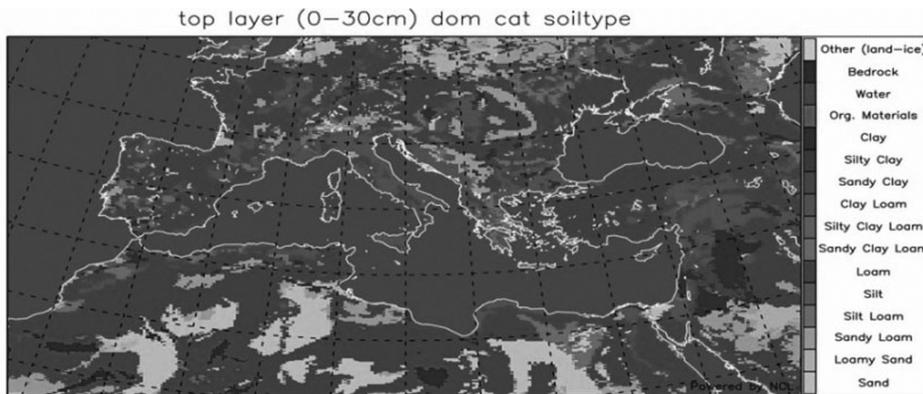
Η αρχική εγκατάσταση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε τον Ιανουάριο του 2008, ενώ η επιχειρησιακή του λειτουργία σε καθημερινή βάση ξεκίνησε τον Ιούλιο του 2008 μετά από εκτεταμένη περίοδο δοκιμών και αξιολογήσεων των προγνώσεων. Ο πρωτογενής κώδικας του μοντέλου αποτελείται από περίπου 5×10^7 γραμμές σε 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 τον προγνωστικό κύκλο 12 UTC του παγκόσμιου προγνωστικού συστήματος 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) σε ερευνητικές, κυρίως, προσομοιώσεις. Για την επιφανειακή θερμοκρασία θάλασσας χρησιμοποιούνται τα real-time-global (rtg) δεδομένα σε $0.083^\circ \times 0.083^\circ$ ανάλυση (Gemill κ.ά. 2007). 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.

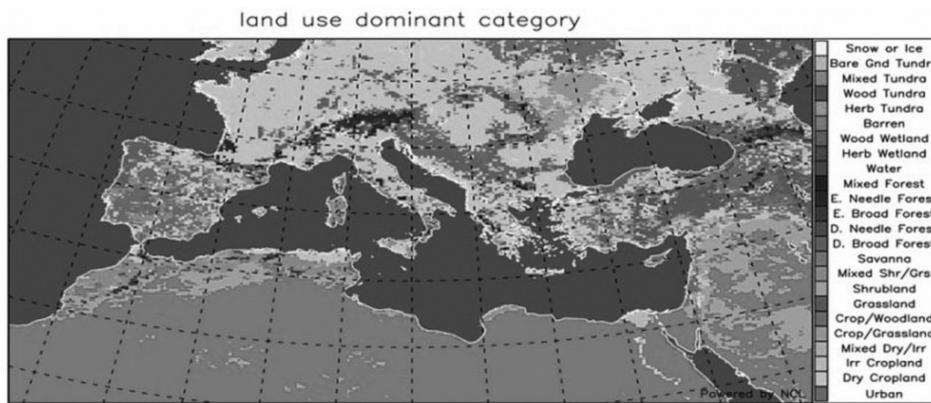
Πεδίο ολοκλήρωσης των προσομοιώσεων αποτελεί η ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου και της Ευρώπης ενώ ο χρονικός ορίζοντας των προγνωστικών προϊόντων είναι 120 ώρες (5 ημέρες). Τα δεδομένα υποβάθρου τοπογραφίας προέρχονται από το United States Geological Survey (USGS) Digital Elevation Model (DEM) σε αρχική ανάλυση 30x30 sec (Σχήμα 4), ενώ τα δεδομένα υποβάθρου για είδος βλάστησης και τύπο εδάφους προέρχονται από το USGS (24 κατηγορίες) και το Federal Agricultural Organization (16 κατηγορίες) αντίστοιχα σε ανάλυση 30x30 sec (Σχήματα 5 και 6).



Σχήμα 4. Τοπογραφία του πεδίου ολοκλήρωσης



Σχήμα 5. Κατηγορίες χρήσης γης (24) του πεδίου ολοκλήρωσης



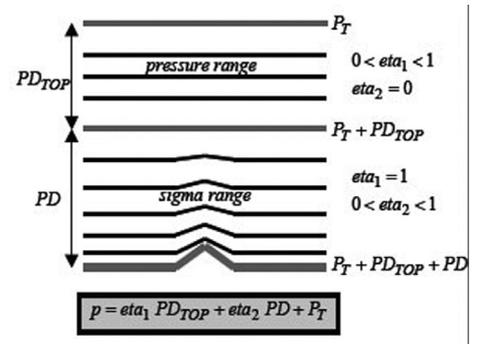
Σχήμα 6. Τύποι εδαφών (16) του πεδίου ολοκλήρωσης

Το μοντέλο παρέχει επίσης τη δυνατότητα πολλαπλών εσωτερικών πλεγμάτων (nests) με μονή ή αμφίδρομη επίδραση δηλαδή ενημέρωση του εσωτερικού και υψηλότερης οριζόντιας ανάλυσης πλέγματος από το εξωτερικό πλέγμα (μονόδρομη επίδραση) ή πέρασμα της προγνωστικής πληροφορίας και από το πυκνό εσωτερικό πλέγμα στο αραιότερο εξωτερικό (αμφίδρομη επίδραση).

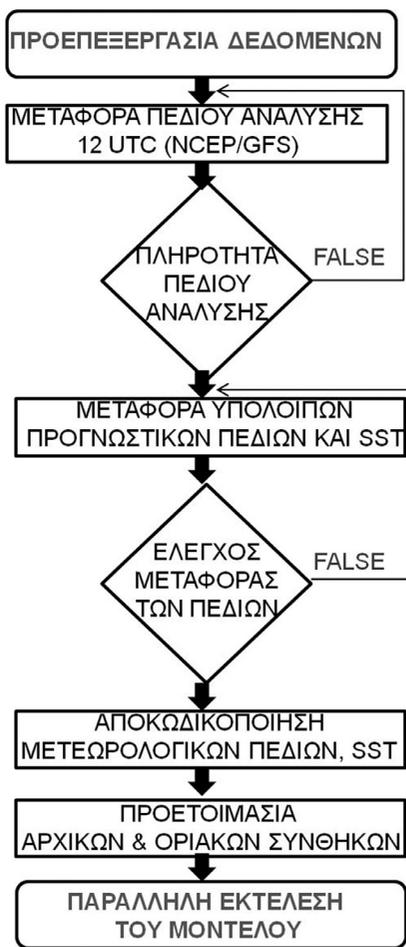
Στην εγκατάσταση του μοντέλου στο ΧΠΑ και για λόγους υπολογιστικής επάρκειας έχει επιλεγεί ένα ενιαίο πεδίο ολοκλήρωσης 305x273 σημείων, με 0.09°x0.09° οριζόντια διακριτοποίηση (~12 km), χρονικό βήμα ολοκλήρωσης 24 sec και 38 ασύμμετρα κατακόρυφα επίπεδα από την επιφάνεια μέχρι τα 25 hPa. Η κατακόρυφη διακριτοποίηση του μοντέλου ακολουθεί τη σ-συντεταγμένη μέχρι τα 400 hPa και την εφαρμογή ισοβαρικών επιπέδων από εκεί και πάνω (Σχήμα 7).

Η επιχειρησιακή διαδικασία των καθημερινών προσομοιώσεων αποτελείται από τρεις κύριες φάσεις:

- Τη φάση συλλογής και προεπεξεργασίας 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).

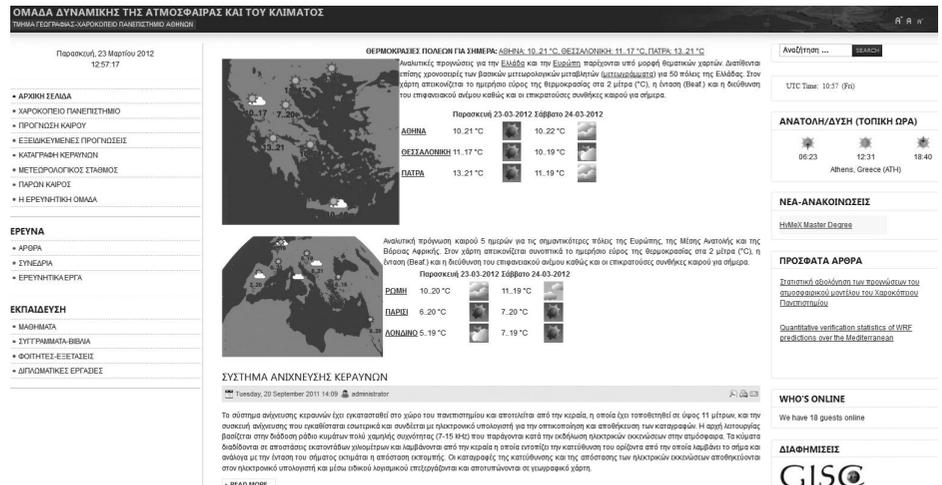


Σχήμα 7. Η κατακόρυφη διακριτοποίηση του μοντέλου



Σχήμα 8. Δομοδιάγραμμα της φάσης προεπεξεργασίας των δεδομένων

Η φάση προεπεξεργασίας των δεδομένων παρουσιάζεται στο δομοδιάγραμμα του σχήματος 8 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. Στην υπολογιστική υποδομή της ΟΔΑΚ, 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 περίπου 1 ώρα. Με βάση τη συγκεκριμένη διαδικασία, παράγονται πάνω από 1,5 GB πρωτογενή δεδομένα σε καθημερινή βάση τα οποία οπτικοποιούνται και διατίθενται ελεύθερα από την ιστοσελίδα <http://meteoclima.gr> (Σχήμα 9). Ειδικότερα στον σύνδεσμο *ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΚΑΙΡΟΥ* διατίθενται πάνω από 10 ατμοσφαιρικές μεταβλητές τόσο για το σύνολο της περιοχής ολοκλήρωσης όσο και εστιασμένες πάνω από το Ελλαδικό χώρο.

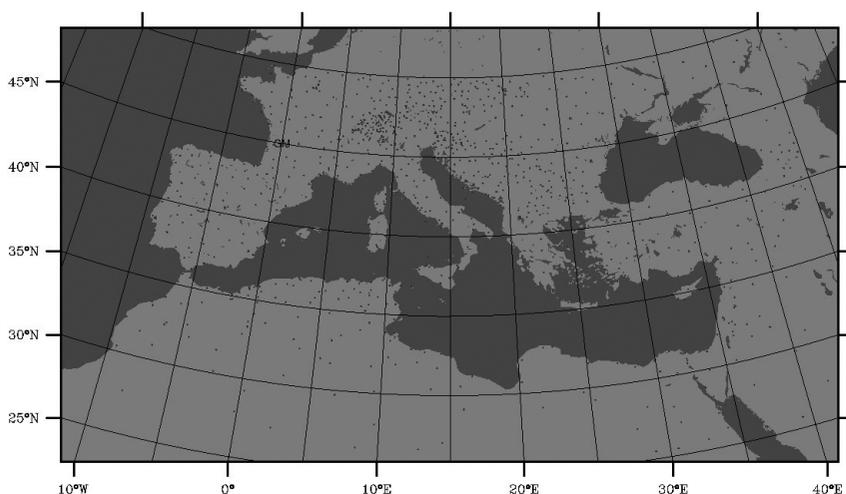


Σχήμα 9. Η ιστοσελίδα <http://meteoclima.gr>

3. Ανάπτυξη μεθοδολογίας στατιστικής αξιολόγησης

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 10).

Καθώς τα σημεία πλέγματος του πεδίου ολοκλήρωσης του μοντέλου συνήθως δεν συμπίπτουν με τις ακριβείς θέσεις των σταθμών, επιλέχθηκε το εγγύτερο χερσαίο σημείο του πλέγματος προς τη θέση του σταθμού ώστε να εξαχθούν οι αντίστοιχες προγνωστικές τιμές. Εναλλακτικά μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος παρεμβολής των εκτιμώμενων τιμών του μοντέλου από τα σημεία του πλέγματος στις ακριβείς θέσεις των σταθμών παρατήρησης, η οποία ανά περίπτωση πι-



Σχήμα 10. Πεδίο ολοκλήρωσης του μοντέλου WRF-NMM. Στα σημεία αποτυπώνονται οι θέσεις των 935 μετεωρολογικών σταθμών

θανόν να προσφέρει σχετικά καλύτερα αποτελέσματα. Η ακολουθούμενη μέθοδος του εγγύτερου προς τον σταθμό σημείου πλέγματος επιτρέπει τη δημιουργία πληθυσμών, αποτελούμενων από ζεύγη εκτιμώμενων και παρατηρούμενων τιμών στις αντίστοιχες ακριβείς θέσεις των σταθμών παρατήρησης. Παρά τη δημιουργία ενός ιδιαίτερα πυκνού συνόλου ζευγών, η άμεση σύγκριση των παρατηρούμενων με τις αντίστοιχες εκτιμώμενες τιμές θεωρείται σε πολλές περιπτώσεις προβληματική. Βασική αιτία αποτελούν διαφοροποιήσεις στην αναπαράσταση των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών από τα αριθμητικά μοντέλα σε σχέση με την πραγματικότητα. Τα αριθμητικά μοντέλα αναγκαστικά απλοποιούν και ομογενοποιούν τις συνθήκες στην επιφάνεια ως σύνολο σημείων πλέγματος, το οποίο σε αρκετές περιπτώσεις εμφανίζεται ως ιδιαίτερα αραιό. Μικρής κλίμακας ιδιαιτερότητες στην επιφάνεια, όπως ορογραφικές εξάρσεις ή τοπογραφικές ασυνέχειες υπό μορφή περιορισμένων υδάτινων επιφανειών, δεν μπορούν να απεικονιστούν από τα αριθμητικά μοντέλα. Η συγκεκριμένη αδυναμία επηρεάζει σημαντικά την ικανότητα επαρκούς ανάλυσης ατμοσφαιρικών φαινομένων και περιγραφής των επιφανειακών ροών ορμής και θερμότητας που επιδρούν στον περιοχικό καιρό και κλίμα (Wilks 1995). Η μη επαρκής αναπαράσταση των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών, που αντιστοιχούν στις ακριβείς τοποθεσίες των σταθμών παρατήρησης, από τα αριθμητικά μοντέλα οδηγούν σε ασυμβατότητες στο πλαίσιο αξιολόγησης των προγνώσεων.

Στη διαδικασία συλλογής των επιφανειακών μετρήσεων εντάσσεται ο ποιοτικός έλεγχος και η συστηματοποίηση αυτών, αφενός για εμφανώς λανθασμένες ή απύσες τιμές και αφετέρου για τιμές ασύμβατες με τις προγνωστικές ώρες του συστήματος. Η συγκεκριμένη διαδικασία περιλαμβάνει αρχικά έλεγχο της σύμπτωσης των θέσεων των σταθμών με σημεία πλέγματος που αντιστοιχούν σε ξηρά και σε αντίθετη περίπτωση οι συγκεκριμένοι σταθμοί απομακρύνονται από τη διαδικασία. Στην αξιολόγηση δεν ελήφθησαν υπόψη σταθμοί με συστηματικά λανθασμένες μετρήσεις ή μετρήσεις εκτός φυσικών ορίων της παρατηρήσιμης μεταβλητής.

Σχετικά με τις συνεχείς στο χώρο μετεωρολογικές παραμέτρους της θερμοκρασίας, της ταχύτητας του ανέμου και της ατμοσφαιρικής πίεσης στη Μέση Στάθμη Θάλασσας (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 εκτιμά την αντιστοιχία ανάμεσα στη μέση τιμή της πρόγνωσης (F) και της παρατήρησης (O). Το συγκεκριμένο μέγεθος υπολογίζει το άθροισμα διαφορών σε σύνολο N τιμών:

$$bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i) = \bar{F} - \bar{O} \quad (3.1)$$

Σε περίπτωση όπου $bias < 0$ το μοντέλο υποεκτιμά το σύνολο τιμών της συγκεκριμένης μεταβλητής, ενώ η τιμή $bias > 0$ σχετίζεται με υπερεκτίμηση της αντίστοιχης τιμής παρατήρησης από το μοντέλο (Katsafados 2003).

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα θεωρείται από τα πλέον διαδεδομένα κατά την εκτίμηση ακρίβειας της πρόγνωσης και λειτουργεί σε πεδία πλέγματος καθ' ύψος καθώς και στο σύνολο συνεχών μεταβλητών των παρατηρήσεων επιφανείας:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2} \quad (3.2)$$

Η συγκεκριμένη σχέση λαμβάνει τιμές στο διάστημα και τέλεια προγνωστικά πεδία προσεγγίζουν την τιμή 0. Το μέγεθος RMSE δεν εμφανίζεται αδιάστατο καθώς διατηρεί τις μονάδες των υπό σύγκριση μετεωρολογικών μεταβλητών (Papadopoulos και Katsafados 2009).

Η αξιολόγηση διακριτών μετεωρολογικών μεταβλητών, όπως ο υετός, βασίζεται στη δημιουργία πίνακα ενδεχομένων, διαστάσεων 2x2, που περιλαμβάνει το σύνολο των πιθανών συνδυασμών πρόγνωσης και παρατήρησης. Το κάθε στοιχείο του πίνακα αντιπροσωπεύει το πλήθος των περιπτώσεων, όπου η εκτιμώμενη και η παρατηρούμενη βροχόπτωση υπερβαίνει προκαθορισμένο ύψος σε αντίστοιχες χρονικές περιόδους. Η κατανομή των τεσσάρων συνδυασμών παριστάνεται στον Πίνακα 1, ο οποίος αποτελεί τυπικό δείγμα πίνακα ενδεχομένων για διακριτές μεταβλητές.

		Observed		
		Yes	No	
Forecast	Yes	a	b	a+b
	No	c	d	c+d
		a+c	b+d	n=a+b+c+d

Πίνακας 1. Πίνακας ενδεχομένων διακριτών μετεωρολογικών μεταβλητών. Τα γράμματα a-d αντιστοιχούν στο σύνολο των πιθανών ζευγών πρόγνωσης/παρατήρησης (σύνθεση από Wilks 1995)

Ο όρος **a** υποδηλώνει το πλήθος των περιπτώσεων όπου οι εκτιμώμενες και παρατηρούμενες τιμές υπερβαίνουν το προκαθορισμένο ύψος βροχόπτωσης και λογίζεται ως επιτυχής πρόγνωση. Αντίστοιχα, επιτυχείς θεωρούνται οι περιπτώσεις μη υπέρβασης του προκαθορισμένου ύψους βροχόπτωσης τόσο από την προγνωστική τιμή όσο και από την τιμή της παρατήρησης, το πλήθος των οποίων αντιστοιχεί στον όρο **d**. Το στοιχείο **b** αντιπροσωπεύει το πλήθος των ενδεχομένων όπου η εκτιμώμενη τιμή υπερβαίνει συγκεκριμένο ύψος βροχόπτωσης, ενώ η αντίστοιχη τιμή παρατήρησης όχι. Το στοιχείο **c** υποδηλώνει τη συχνότητα εμφάνισης περιπτώσεων κατά τις οποίες η μετρούμενη τιμή υπερβαίνει προκαθορισμένο ύψος βροχόπτωσης σε αντίθεση με την εκτιμώμενη τιμή. Το ενδεχόμενο **b** χαρακτηρίζεται ως εσφαλμένη πρόγνωση, ενώ το ενδεχόμενο **c** ως αποτυχή πρόγνωση. Το σύνολο των πιθανών συνδυασμών είναι $n=a+b+c+d$ με τις ιδεατές προγνώσεις να επιδεικνύουν $b=c=0$ (Katsafados 2003).

Ο πίνακας ενδεχομένων αποτελεί τη βάση για θεμελίωση βαθμωτών στατιστικών μεγεθών στο πλαίσιο αξιολόγησης διακριτών μετεωρολογικών μεταβλητών. Στη συγκεκριμένη εργασία η αξιολόγηση των προγνωστικών δεδομένων βροχόπτωσης βασίστηκε στους στατιστικούς δείκτες του συστηματικού σφάλματος (bias, B) και της τετραγωνικής ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (root mean square error, rmse), οι οποίοι προκύπτουν από τον πίνακα ενδεχομένων. Ειδικότερα, το συστηματικό σφάλμα αποτελεί την αναλογία της συχνότητας θετικών εκτιμήσεων (περιπτώσεις προγνώσεων “Yes” του πίνακα ενδεχομένων) προς τη συχνότητα θετικών παρατηρήσεων (περιπτώσεις παρατηρήσεων “Yes” του πίνακα ενδεχομένων) και περιγράφεται ως:

$$B = \frac{a + b}{a + c} \quad (3.3)$$

Προγνώσεις με $B=1$ υποδηλώνουν πως η συγκεκριμένη περίπτωση υπέρβασης προκαθορισμένου ύψους βροχής εκτιμήθηκε με την ίδια συχνότητα με την οποία παρατηρήθηκε. Τιμές σφάλματος μεγαλύτερες της μονάδας αντιστοιχούν σε περιπτώσεις οι οποίες εκτιμήθηκαν συχνότερα από ότι παρατηρήθηκαν και ταυτίζονται με υπερεκτίμηση της πρόγνωσης.

Η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος ποσοτικοποιεί το εύρος των διαφορών ανάμεσα στις εκτιμώμενες τιμές και στις παρατηρήσεις που υπερβαίνουν προκαθορισμένο ύψος βροχής (Colle κ.ά. 1999· 2000). Η εξίσωση που εκφράζει το rmse λαμβάνει μορφή αντίστοιχη της σχέσης (3.2):

$$rmse = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - X_i)^2} \quad (3.4)$$

όπου και τα αντίστοιχα εκτιμώμενα και μετρούμενα ύψη βροχής σε σύνολο N παρατηρήσεων που υπερβαίνουν το προκαθορισμένο όριο. Η συμπεριφορά του συγκεκριμένου στατιστικού μεγέθους εμφανίζεται ταυτόσημη με την αντίστοιχη για συνεχείς μεταβλητές.

Οι στατιστικοί δείκτες που προκύπτουν από τις παραπάνω σχέσεις για τις συνεχείς και τις διακριτές μεταβλητές εκφράζουν την απόκλιση των προγνώσεων από τις πραγματικές τιμές και εφαρμόστηκαν για τις πρώτες 72 προγνωστικές ώρες του συστήματος προκειμένου να διαπιστωθεί η χρονική εξέλιξη της προ-

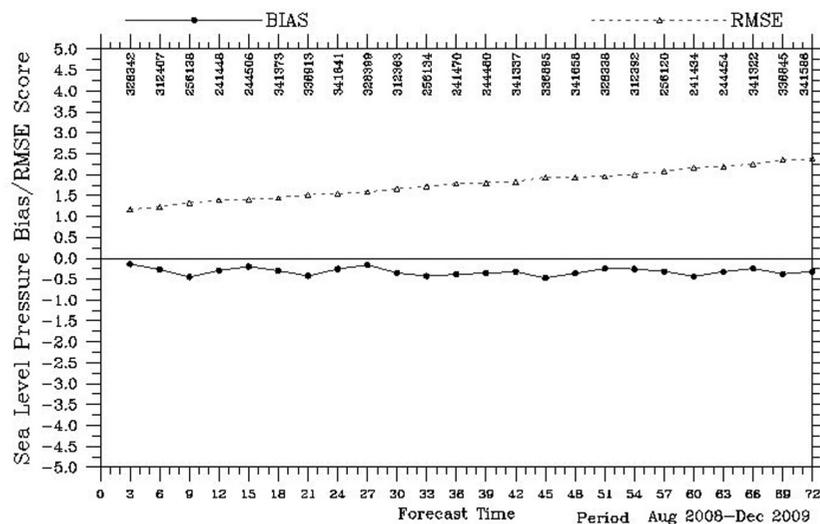
γνωστικής ικανότητας του μοντέλου. Οι συγκεκριμένοι δείκτες υπολογίστηκαν σε μηνιαία βάση, από τον Αύγουστο του 2008 έως και το Δεκέμβριο του 2009 (17 μήνες) καθώς και για το σύνολο της συγκεκριμένης περιόδου με σκοπό την αξιολόγηση της απόδοσης του προγνωστικού μοντέλου.

4. Ανάλυση Αποτελεσμάτων

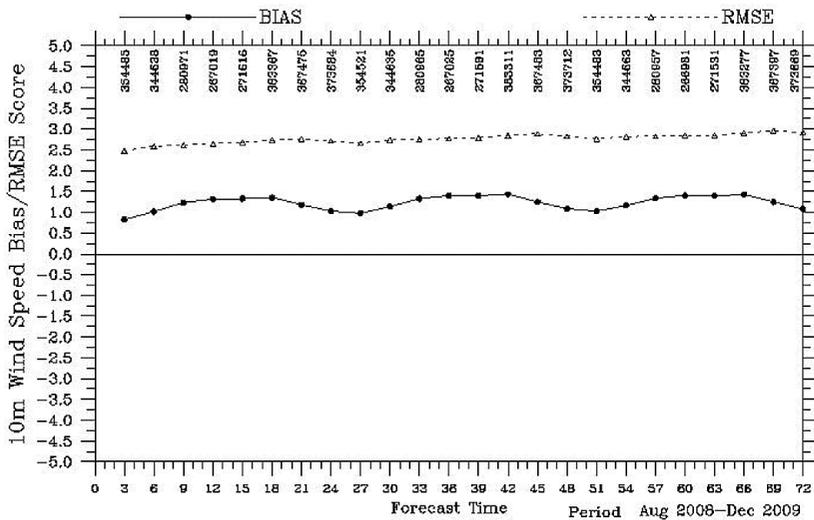
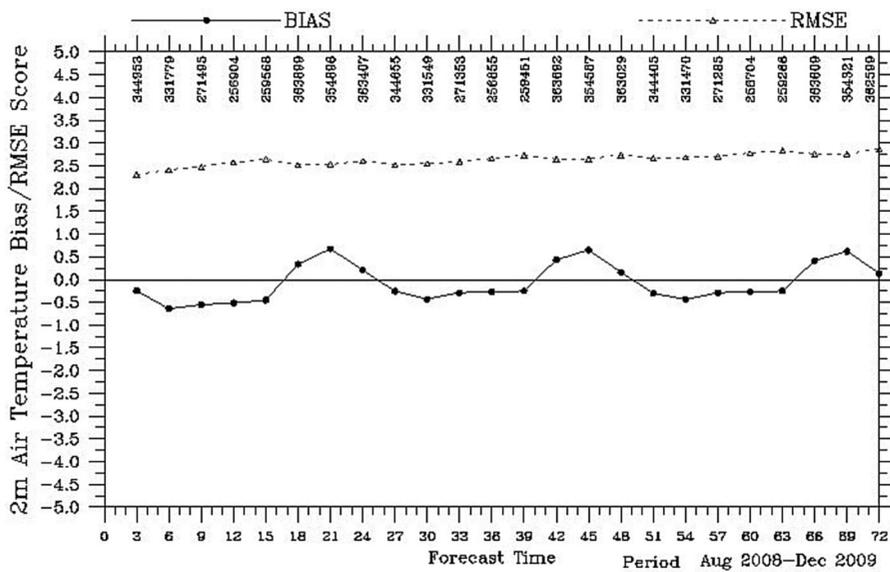
4.1 Συνολική Περίοδος

Τα στατιστικά μεγέθη RMSE και bias εκτιμήθηκαν για το σύνολο των σταθμών επιφανείας και αφορούν την ατμοσφαιρική πίεση στη ΜΣΘ, τη θερμοκρασία του αέρα στα 2 μ. και την ένταση του ανέμου στα 10 μ. Ειδικότερα, η ατμοσφαιρική πίεση παρουσιάζει σταδιακή αύξηση του σφάλματος με τον προγνωστικό χρόνο υποδηλώνοντας ισχυρή χρονική εξάρτηση της προγνωστικότητας του συγκεκριμένου πεδίου (Σχήμα 11α). Συνδυάζεται επίσης με περιορισμένη υποεκτίμηση μέχρι 0.5 hPa στο σύνολο της προγνωστικής περιόδου.

Το προγνωστικό σφάλμα της θερμοκρασίας στα 2 μ. δείχνει περιορισμένη εξάρτηση από τον χρόνο και κυμαίνεται σε εύρος από 2.5 έως 3°C, για το σύνολο της περιόδου. Το bias εμφανίζει ημερήσιο κύκλο με αξιοσημείωτη περιοδικότητα με υποεκτίμηση τις νυχτερινές ώρες και υπερεκτίμηση τις πρωινές και μεσημβρινές ώρες (Σχήμα 11β). Η συγκεκριμένη συμπεριφορά μπορεί να αποδοθεί κυρίως στην ελλιπή περιγραφή των επιφανειακών ροών ενέργειας η οποία πιθανώς να προέρχεται από την αρχικοποίηση και τη λειτουργία του υπομοντέλου εδάφους. Στην περίπτωση της έντασης του ανέμου στα 10 μ. εντοπίζεται συστηματική υπερεκτίμηση στο σύνολο της προγνωστικής περιόδου η οποία κυμαίνεται από 0.5 m s⁻¹ κατά τις απογευματινές ώρες και λαμβάνει μέγιστες τιμές κατά τις πρωινές ώρες μέχρι 1.5 m s⁻¹. Με βάση τους Roux κ.ά. (2009) τα μέγιστα του προγνωστικού σφάλματος του ανέμου εντοπίζονται σε υψόμετρα από 700-1500 m καθώς και σε παράκτιες περιοχές και βρίσκονται σε γενική συμφωνία τόσο με τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης αξιολόγησης όσο και με τα αποτελέσματα από ανάλογες εργασίες (Katsafados κ.ά. 2011).

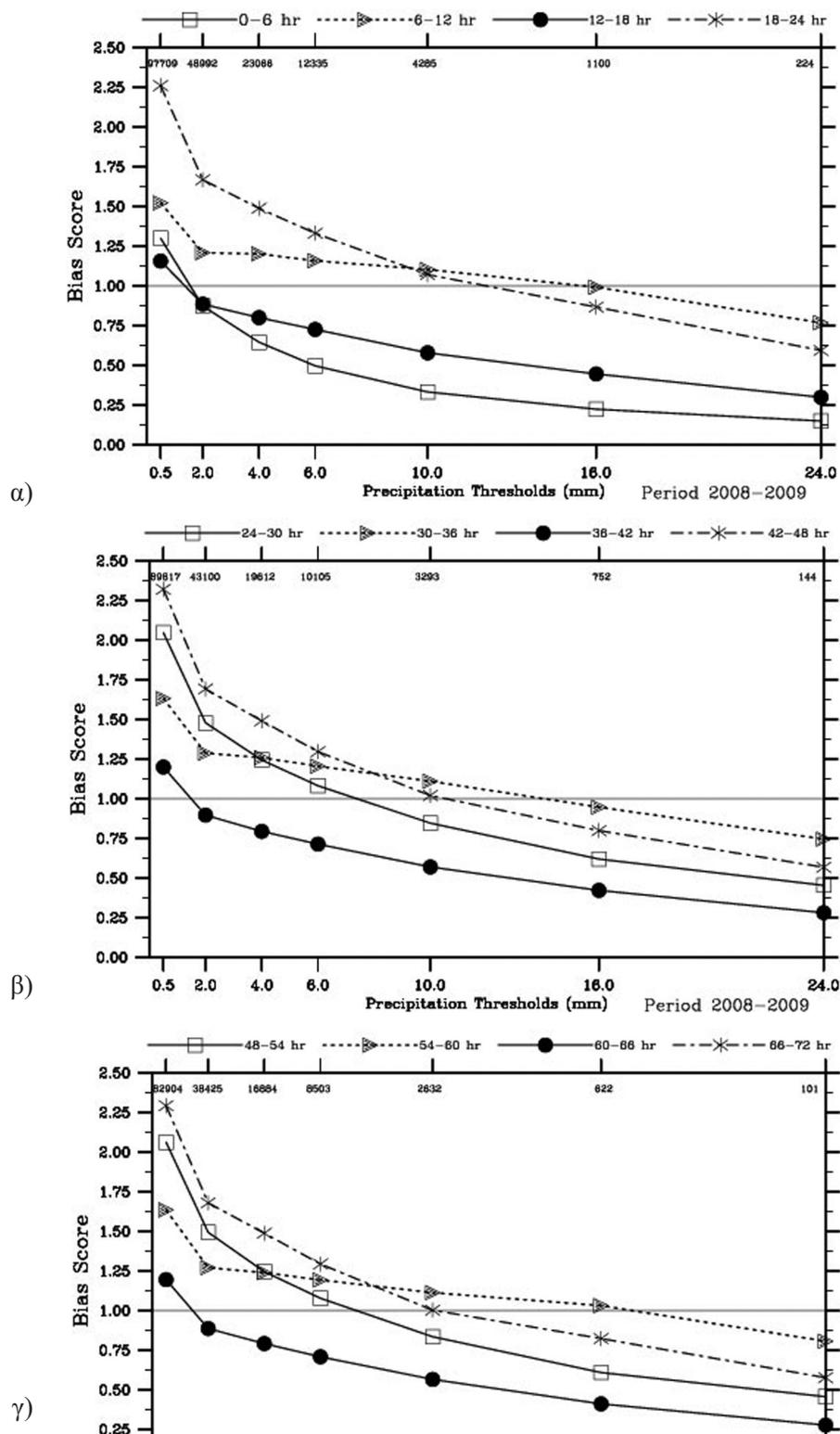


α)



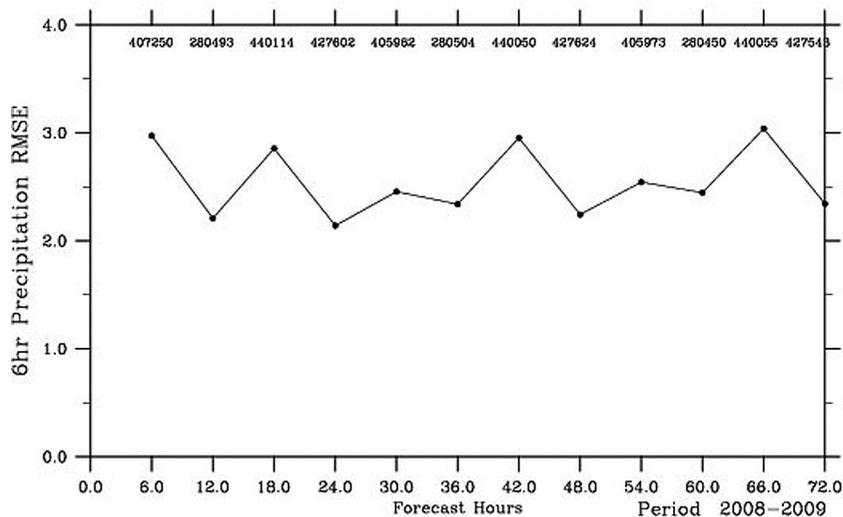
Σχήμα 11. Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE (διακεκομμένη γραμμή) και bias (συνεχής γραμμή) (α) της ατμοσφαιρικής πίεσης στη ΜΣΘ σε hPa, (β) της θερμοκρασίας στα 2 μ. σε °C και (γ) και ταχύτητας ανέμου στα 10 μ. σε $m s^{-1}$ για το σύνολο του εξεταζόμενου διαστήματος. Στον κάτω οριζόντιο άξονα αποτυπώνονται οι προγνωστικές ώρες, με ώρα ανάλυσης τις 12 UTC, ενώ στον άνω άξονα εμφανίζεται ο δειγματικός χώρος (πλήθος των ζευγών πρόγνωσης-παρατήρησης)

Το συστηματικό σφάλμα (bias) εκτιμήθηκε για τον αθροιστικό υετό 6ωρου για το σύνολο της περιόδου αξιολόγησης (Αύγουστος 2008-Δεκέμβριος 2009) χωριζόμενο σε 7 διακριτές κλάσεις των 0.5, 2, 4, 6, 10, 16 και 24 mm. Στο Σχήμα 12α παρουσιάζεται το bias του πρώτου προγνωστικού 24ωρου το οποίο εμφανίζει συστηματική υπερεκτίμηση των μικρών υψών υετού (0.5 mm) για το σύνολο των επιμέρους 6ωρων με μέγιστο 2.26 την περίοδο 18-24. Τα μεσαία ύψη υετού (2-10 mm) υπερεκτιμούνται ελαφρά κατά τις προγνωστικές περιόδους 6-12 και 18-24 ενώ εμφανίζουν υποεκτίμηση κατά τις περιόδους 0-6 και 12-18. Ανάλογη συμπεριφορά εμφανίζουν και τα επόμενα 24ωρα με αναμενόμενα ενισχυμένη υπερεκτίμηση των μικρών και μεσαίων υψών μέχρι 2.34 την προγνωστική περίοδο 42-48 και υποεκτίμηση των υψών που υπερβαίνουν τα 16 και 24 mm (Σχήμα 12β και γ).



Σχήμα 12. Διακύμανση του συστηματικού σφάλματος (bias) των αθροιστικών 6ωρων υετίσιμων κατακρημιτισμάτων ανά διακριτά ύψη για (α) το πρώτο 24ωρο, (β) το δεύτερο 24ωρο και (γ) το τρίτο 24ωρο για το σύνολο του εξεταζόμενου διαστήματος (Αύγουστος 2008-Δεκέμβριος 2009). Στον κάτω οριζόντιο άξονα αποτυπώνονται οι κλάσεις βροχοπτώσης (mm) ενώ στον άνω άξονα εμφανίζεται ο δειγματικός χώρος (πλήθος των ζευγών πρόγνωσης-παρατήρησης) ανά κλάση

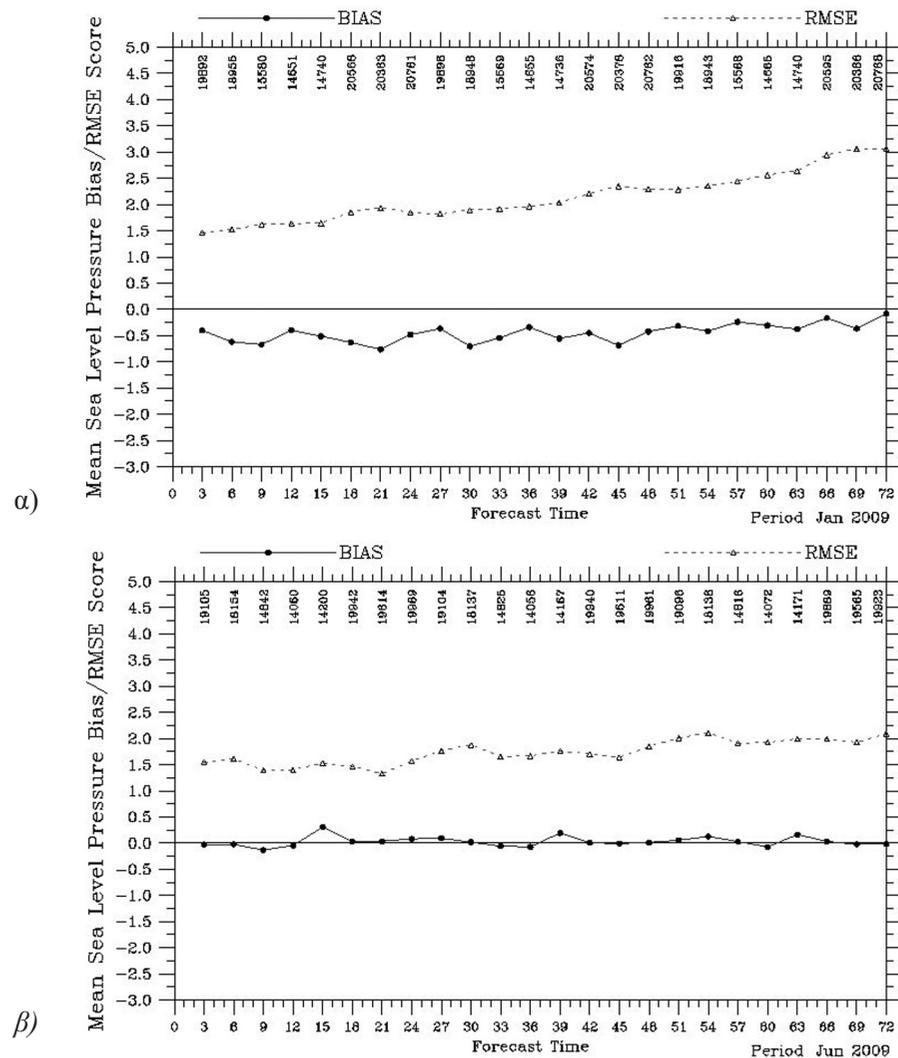
Το προγνωστικό σφάλμα (RMSE) του 6ωρου αθροιστικού υετού εμφανίζει σχετικά περιορισμένη διακύμανση από 2.3 έως 3.1 mm χωρίς να αυξάνεται σημαντικά με τον προγνωστικό χρόνο (Σχήμα 13).



Σχήμα 13. Χρονική διακύμανση του προγνωστικού σφάλματος (RMSE) των αθροιστικών 6ωρων υετίσιμων κατακρημισμάτων. Στον κάτω οριζόντιο άξονα αποτυπώνονται οι προγνωστικές ώρες, με ώρα ανάλυσης τις 12 UTC, ενώ στον άνω άξονα εμφανίζεται ο δειγματικός χώρος (πλήθος των ζευγών πρόγνωσης-παρατήρησης)

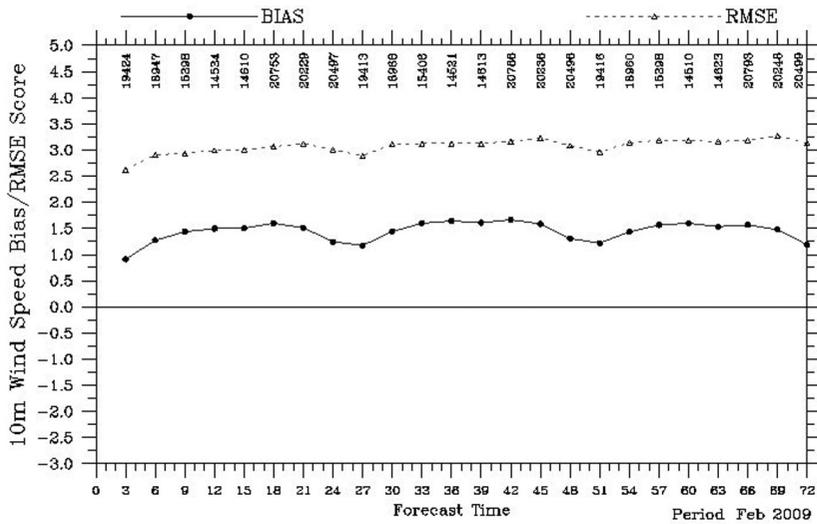
4.2 Μηνιαία διακύμανση

Σημαντική μηνιαία διακύμανση εμφανίζουν οι εξεταζόμενοι δείκτες σφάλματος καθώς και η ακρίβεια της πρόγνωσης για τα πεδία της πίεσης στη ΜΣΘ, της θερμοκρασίας στα 2 μ. και της έντασης του ανέμου στα 10 μ. Ενδεικτικά παρουσιάζονται οι μήνες που κατέδειξαν τις σημαντικότερες διακυμάνσεις ανά προγνωστικό πεδίο. Ειδικότερα, η ατμοσφαιρική πίεση στην ΜΣΘ παρουσιάζει σχεδόν μηδενικό συστηματικό σφάλμα κατά τους θερινούς μήνες με σχετική μείωση της ακρίβειας μέχρι 2 hPa προς το τέλος του προγνωστικού ορίζοντα (Σχήμα 14β). Αντίθετα, κατά τη χειμερινή περίοδο, εμφανίζεται συστηματική υποεκτίμηση (0.5 έως 1 hPa), αλλά με σημαντική αύξηση του σφάλματος έως και τις 72 ώρες (Σχήμα 14α). 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.

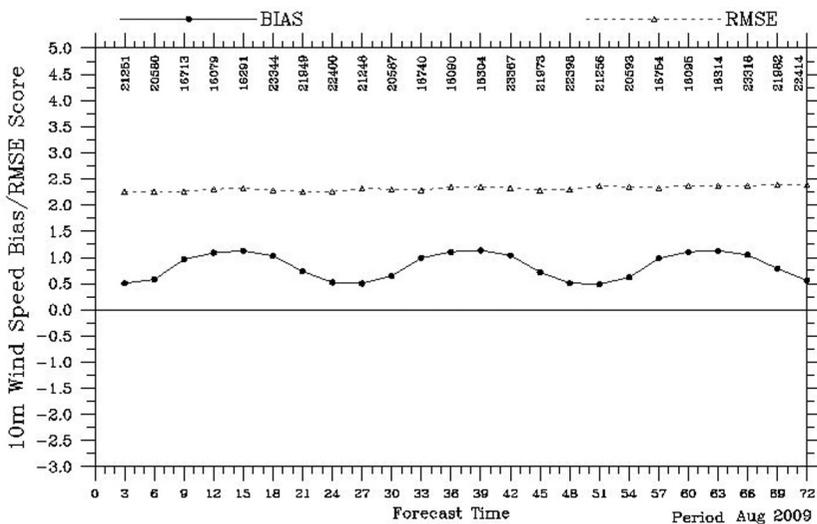


Σχήμα 14. Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE (διακεκομμένη γραμμή) και bias (συνεχής γραμμή) της ατμοσφαιρικής πίεσης στη ΜΣΘ σε hPa, για α) τον Ιανουάριο 2009 και β) τον Ιούνιο 2009. Στον κάτω οριζόντιο άξονα αποτυπώνονται οι προγνωστικές ώρες, με ώρα ανάλυσης τις 12 UTC, ενώ στον άνω άξονα εμφανίζεται ο δειγματικός χώρος (πλήθος των ζευγών σύγκρισης)

Η ένταση του ανέμου στα 10 μ. υπερεκτιμάται στο σύνολο των επιμέρους μηνών της εξεταζόμενης περιόδου με μέγιστες τιμές μέχρι 1.5 m s^{-1} κατά τους χειμερινούς μήνες (Σχήμα 15α). Το συστηματικό σφάλμα εμφανίζει επίσης σημαντική ημερήσια κύμανση με τη μέγιστη υπερεκτίμηση να εντοπίζεται κατά τις νυχτερινές και πρωινές ώρες. Η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος λαμβάνει μικρότερες τιμές κατά την θερινή περίοδο ($\sim 2.5 \text{ m s}^{-1}$) και παραμένει σχετικά σταθερή στο σύνολο της προγνωστικής περιόδου (Σχήμα 15β). Αντίθετα το προγνωστικό σφάλμα τη χειμερινή περίοδο υπερβαίνει τα 3 m s^{-1} σε κάποιες περιπτώσεις. Συνεπώς το μοντέλο φαίνεται να αναπαριστά ικανοποιητικά τις ισχυρές θερμικές κυκλοφορίες (πχ. θαλάσσια αύρα) που αναπτύσσονται κατά την περίοδο της μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας.



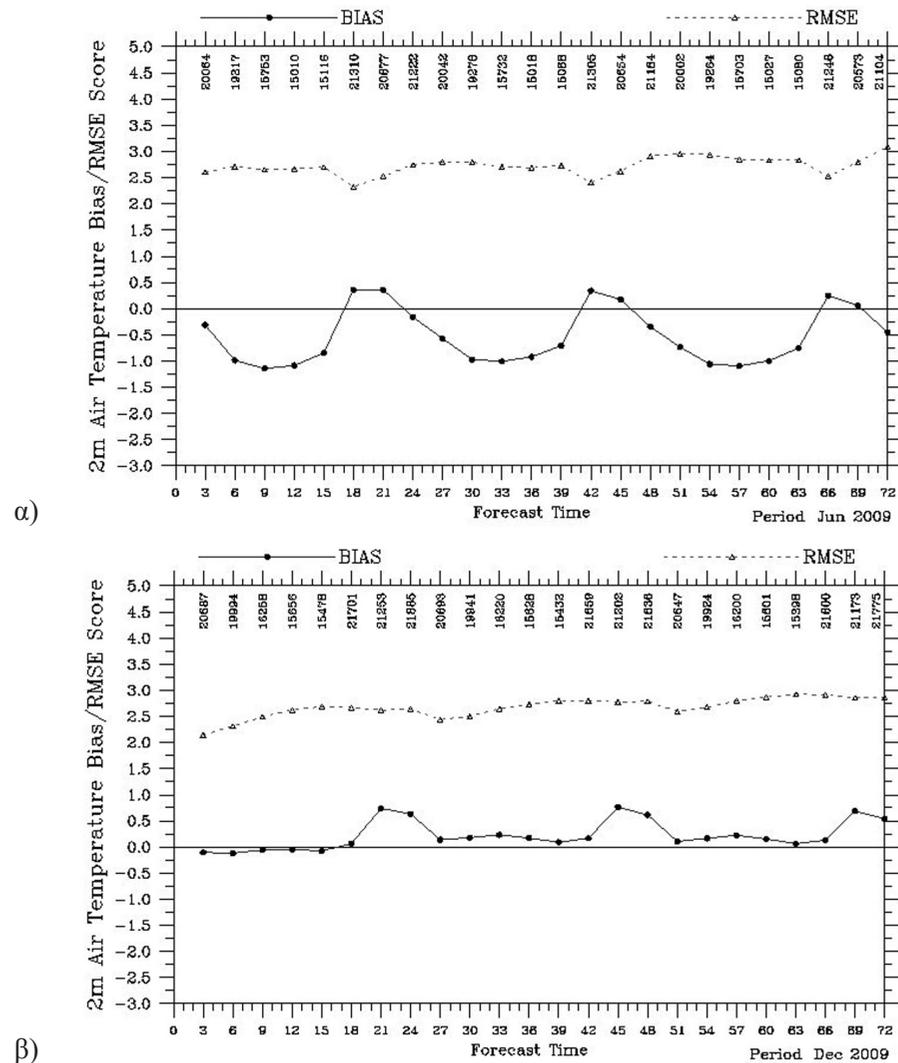
α)



β)

Σχήμα 15. Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE (διακεκομμένη γραμμή) και bias (συνεχής γραμμή) της ταχύτητας του ανέμου στα 10 μ. σε m s^{-1} , για α) τον Φεβρουάριο 2009 και β) τον Αύγουστο 2009. Στον κάτω οριζόντιο άξονα αποτυπώνονται οι προγνωστικές ώρες, με ώρα ανάλυσης τις 12 UTC, ενώ στον άνω άξονα εμφανίζεται ο δειγματικός χώρος (πλήθος των ζευγών σύγκρισης)

Η συμπεριφορά του συστηματικού σφάλματος της θερμοκρασίας είναι αναμενόμενη εμφανίζοντας ημερήσια κύμανση η οποία είναι πιο σημαντική τους θερινούς μήνες. Ειδικότερα την περίοδο μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας (Σχήμα 16α) 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 και την εμφάνιση μεγαλύτερου ημερήσιου θερμομετρικού εύρους. Αντίθετα το συστηματικό σφάλμα εμφανίζεται ιδιαίτερα περιορισμένο κατά τους χειμερινούς μήνες και συνδυάζεται με σχετικά μειωμένο προγνωστικό σφάλμα (Σχήμα 16β).



Σχήμα 16. Χρονική διακύμανση των στατιστικών μεγεθών RMSE (διακεκομμένη γραμμή) και bias (συνεχής γραμμή) της θερμοκρασίας στα 2 μ. σε °C, για (α) τον Ιούνιο του 2009 και (β) το Δεκέμβριο του 2009. Στον κάτω οριζόντιο άξονα αποτυπώνονται οι προγνωστικές ώρες, με ώρα ανάλυσης τις 12 UTC, 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

Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά του αριθμητικού μοντέλου WRF το οποίο έχει εγκατασταθεί στην παράλληλη υπολογιστική υποδομή του Τμήματος Γεωγραφίας του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου Αθηνών παρέχοντας επιχειρησιακή πρόγνωση καιρού 5 ημερών για την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου. Το σύνολο των προγνωστικών δεδομένων σε μορφή μετεωρολογικών χαρτών, μετεογραμμμάτων και τεφιγραμμμάτων είναι διαθέσιμα σε καθημερινή βάση από την ιστοσελίδα <http://meteoclima.gr>.

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης έρευνας αναπτύχθηκε επίσης κατάλληλη μεθοδολογία και λογισμικό για τη στατιστική αξιολόγηση των προγνώσεων του μη υδροστατικού αριθμητικού μοντέλου WRF-NMM. Με βάση τους στατιστικούς δείκτες, το μοντέλο παρουσιάζει ικανοποιητική προγνωστική συμπεριφορά τόσο για τις συνεχείς όσο και για τις διακριτές μεταβλητές στο σύνολο της περιόδου αξιολόγησης (Αύγουστος 2008-Δεκέμβριος 2009). Τα προγνωστικά πεδία που αξιολογήθηκαν ήταν η ατμοσφαιρική πίεση στη ΜΣΘ, η θερμοκρασία στα 2 μ., η ένταση του ανέμου στα 10 μ. καθώς και ο αθροιστικός υετός 6 ώρου.

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 κατά τη θερινή περίοδο μπορούν εν μέρει να αποδοθούν στην εξασθένηση της μεταβλητότητας της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας σε σχέση με τους χειμερινούς μήνες. Το προγνωστικό σφάλμα της θερμοκρασίας διατηρείται σε αναμενόμενες και αποδεκτές τιμές, ενώ παρουσιάζεται συστηματική υποεκτίμηση των ελαχίστων θερμοκρασιών κατά τη θερμή περίοδο, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί σε πιθανό έλλειμα υγρασίας στο έδαφος προερχόμενο από την αρχικοποίηση του μοντέλου ή από τη λειτουργία του υπομοντέλου εδάφους. Η ένταση του ανέμου υπερεκτιμάται συστηματικά με μέγιστη τιμή κατά τη χειμερινή περίοδο μέχρι 1.5 m s^{-1} .

Με βάση τη στατιστική αξιολόγηση της προγνωστικότητας του αθροιστικού υετού προκύπτει συστηματική υπερεκτίμηση των μικρών υψών υετού (0.5 mm) με μέγιστο bias 2.34 στο σύνολο της προγνωστικής περιόδου των 72 ωρών. Τα μεσαία ύψη υετού (2-10 mm) υποεκτιμούνται ελαφρά κυρίως κατά το δεύτερο και τρίτο 24ωρο ενώ υποεκτιμούνται συστηματικά τα ύψη που υπερβαίνουν τα 16 και 24 mm.

Συνοψίζοντας, το συγκεκριμένο ατμοσφαιρικό προγνωστικό σύστημα στην επιχειρησιακή διαμόρφωση που ακολουθεί στο Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο εκτίμησης του καιρού για τον ελλαδικό χώρο και την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου. Στόχο μελλοντικής έρευνας αποτελεί η αξιολόγηση πεδίων ανώτερης ατμόσφαιρας (γεωδυναμικό ύψος, θερμοκρασία, σχετική υγρασία) σε συνδυασμό με τη χωρική κατανομή των σφαλμάτων με σκοπό την βελτίωση των σχημάτων παραμετροποίησης των διεργασιών του οριακού στρώματος της ατμόσφαιρας και του υπομοντέλου εδάφους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Chen, F. και Dudhia, J. (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.
- Colle, B.A., Westrick, K.J. και Mass, C.F. (1999), «Evaluation of MM5 and Eta-10 Precipitation Forecasts over the Pacific Northwest during the Cool Season», *Wea. Forecasting* 14: 137-154.
- Colle, B.A., Mass, C.F. και Westrick, K.J. (2000), «MM5 precipitation verification over the Pacific Northwest during the 1997-1998 cool seasons», *Wea. Forecasting* 15: 730-744.
- Galanis, G., Louka P., Katsafados P., Kallos, G. και Pytharoulis I. (2006), «Applications of Kalman filters based on non linear functions to numerical weather predictions», *Annales Geophysicae* 24, 2451-2460.
- Gemmill, W., Katz, B. και Li, X. (2007), «Daily Real-Time Global Sea Surface Temperature - High Resolution Analysis at NOAA/NCEP», NOAA / NWS / NCEP / MMAB Office Note Nr. 260, 39 σ.
- Gozzini, B., Bartolini, G., Grifoni, D., Messeri, G., Pasi, F., Piani, F., Rossi, M. και Tei, C. (2008), *Evaluation of Year 2007 Operational WRF-NMM*, 9th WRF workshop Boulder, Colorado, 23-27 Ιουνίου 2008.
- Janjic, Z.I., Gerrity, J.P. και 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*, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Katsafados, P., Papadopoulos, A., Mavromatidis, E. και Gkikas, N. (2011): «Quantitative verification statistics of WRF predictions over the Mediterranean region», 12th Annual WRF Users' Event, 20-24 Ιουνίου 2011, Boulder CO, USA.
- Kallos, G., Nickovic, S., Papadopoulos, A., Jovic, D., Kakaliagou, O., Misirlis, N., Boukas, L., Mimikou, N., Sakellariadis, G., Papageorgiou, J., Anadranistakis, E. και Manousakis, M (1997), «The regional weather forecasting system SKIRON: An overview», *Proceedings of the Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments*, Αθήνα, 15-17 Οκτωβρίου 1997, σσ. 109-122.
- Papadopoulos, A., Katsafados, P., Kallos, G. και Nickovic, S. (2002), «The weather forecasting system for POSEIDON-An overview», *GAOS* 8(2-3): 219-237.
- 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., Liu, Y., Monache, L.D., Shey, R.S. και Warner, T.T. (2008), *Verification of High Resolution WRF-STFDDA Surface Forecasts over mountains and plains*, 9th WRF workshop, Boulder, Colorado, 23-27 Ιουνίου 2008.
- Schwarzkopf, M.D. και Fels, S. (1991), «The simplified exchange method revisited: An accurate, rapid method for computation of infrared cooling rates and fluxes», *Journal of Geophysical Research* 96(D5): 9075-9096.
- Wilks, D.S. (1995), *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Academic Press.
- Zilitinkevich, S. (1995), «Non-local turbulent transport: Pollution dispersion aspects of coherent structure of convective flows», στο Power, H., Moussiopoulos, N. και Brebbia, C.A. (επιμ.), *Air Pollution Theory and Simulation, Air Pollution III*, τ. Α', Computational Mechanics Publications, σσ. 53-60.