

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

ΙΩΑΝΝΗΣ Γ. ΚΑΘΑΡΟΠΟΥΛΟΣ

Πτυχιούχος Φυσικός

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΝΤΟΝΗΣ ΨΥΧΡΗΣ ΕΙΣΒΟΛΗΣ ΜΕ ΤΗ
ΧΡΗΣΗ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2018

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΝΤΟΝΗΣ ΨΥΧΡΗΣ ΕΙΣΒΟΛΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών ‘Μετεωρολογία Κλιματολογία και Ατμοσφαιρικό Περιβάλλον’ Τομέας Μετεωρολογίας Κλιματολογίας

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης:

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Επίκουρος Καθηγητής Πυθαρούλης Ιωάννης, Επιβλέπων

Καθηγητής Καρακώστας Θεόδωρος, Μέλος Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

Αναπληρωτής Καθηγητής Ζάνης Πρόδρομος, Μέλος Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής επετηρίδας Τμήματος Γεωλογίας Ν°
© Ιωάννης Γ. Καθαρόπουλος, 2018
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΝΤΟΝΗΣ ΨΥΧΡΗΣ ΕΙΣΒΟΛΗΣ ΜΕ ΤΗ
ΧΡΗΣΗ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Απαγορεύεται η αντιγραφή, απόθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, απόθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή του Τομέα Μετεωρολογίας Κλιματολογίας του τμήματος Γεωλογίας και επιβλέποντα της παρούσης εργασίας κύριο Πυθαρούλη Ιωάννη για την αμέριστη και συνεχή βοήθεια που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της παρούσης διατριβής ειδίκευσης. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον Αναπληρωτή Καθηγητή του τομέα Μετεωρολογίας Κλιματολογίας του τμήματος Γεωλογίας κύριο Πρόδρομο Ζάνη για τις συμβουλές που μου έδωσε κατά την πορεία εκπόνησης της διατριβής ειδίκευσης καθώς και για την βοήθεια, τις συμβουλές και την κατανόηση του στις ανάγκες που μου παρουσιάστηκαν κατά την διάρκεια του μεταπτυχιακού μου προγράμματος. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του τομέα Μετεωρολογίας Κλιματολογίας του τμήματος Γεωλογίας κύριο Καρακώστα Θεόδωρο για την βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια του μεταπτυχιακού μου προγράμματος.

Περίληψη

Η μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη πρόβλεψη ακραίων καιρικών φαινομένων, είναι μια συνιστώσα της επιστήμης της Μετεωρολογίας που συνεχώς αναπτύσσεται καθώς οι επιπτώσεις των τελευταίων στις ανθρώπινες δραστηριότητες και στην ίδια την ζωή του ανθρώπου είναι μεγάλες. Αν σε αυτό προστεθεί η κλιματική αλλαγή, που σύμφωνα με πολλές έρευνες ήδη συμβάλει, και θα συμβάλει στην αύξηση των ακραίων καιρικών φαινομένων στον πλανήτη κάποιος εύκολα καταλαβαίνει την ανάγκαιότητα για έγκαιρη πρόγνωση ακραίων και επικίνδυνων συμβάντων. Αξιολογώντας τα παραπάνω αποφασίσαμε να εστιάσουμε την προσοχή μας στην πρόγνωση έντονων ψυχρών εισβολών στην περιοχή των Ανατολικών Βόρειων Ηνωμένων Πολιτειών. Σκοπός της εργασίας είναι να μελετηθεί η ικανότητα ενός παγκόσμιου μοντέλου αριθμητικής πρόγνωσης, να αναπαραστήσει και να προγνώσει ικανοποιητικά μια ψυχρή εισβολή με αρκετά μεγάλο σήμα στην περιοχή που αναφέρθηκε περίπου ένα μήνα πριν το συμβαν (Μεσοπρόθεσμη-Μακροπρόθεσμη πρόγνωση). Για την μελέτη της ευαισθησίας του γεγονότος και του μοντέλου στις θερμοκρασίες θάλασσας, πραγματοποιήθηκαν αρχικά προσομοιώσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν διαφορετικά 'πακέτα' θερμοκρασιών θάλασσας και στη συνέχεια έλαβε χώρα σύγκριση ανάμεσα στις προσομοιώσεις αλλά και σύγκριση με τα δεδομένα των αναλύσεων για την ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Το μεγαλύτερο μέρος των προσομοιώσεων ήταν ικανό να αναπαραστήσει την ατμοσφαιρική κυκλοφορία στην Βόρεια Αμερική το τελευταίο επτάημερο του Ιανουαρίου

Abstract

Mid and long range forecast of extreme events is a fast growing discipline of meteorology. This is primarily due to the severe impact of extreme events on human activities and life. Taking into account Climate Change which contributes directly to the intensity and the increase of the number of extreme events, (always according to recent articles and publications), one can understand the importance and the necessity of the early accurate forecast of extremes. After considering the latter, it was decided to focus on the forecast of intense cold intrusions in the area of North East United States. The goal of this thesis is to evaluate the ability of a Global Weather Numerical Model (GWRP) to represent and forecast a large scale cold intrusion in the area of North East United States one month prior to the event. For the evaluation of the sensitivity of the model and the event in the Sea Surface Temperatures (SSTs) a set of simulations with different SSTs was performed. They were compared with each other and with reanalysis data in order to quantify the forecasting ability. Most of the simulations were able to reconstruct accurately the atmospheric circulation above North America during the last week of January

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	4
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	9
2.1 Αέριες μάζες.....	9
2.2 Αεροχείμαρροι.....	10
2.3 Κύματα Rossby	12
2.4 Ψυχρές εισβολές.....	13
2.5 Ψυχρές εισβολές στο Ανατολικό τμήμα της Βόρειας Αμερικής.....	14
2.6 Πρόγνωση Καιρού.....	19
2.7 Σφάλματα μοντέλων.....	22
2.8 Στοχαστική πρόγνωση - Μέθοδος LAF	22
2.7 Ακραία καιρικά φαινόμενα και μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη προγνωση τους..	25
3 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ-ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	27
3.1 Εισαγωγή.....	27
3.2 Χαρακτηριστικά χειμώνα 2013-2014 Βόρεια Αμερική	27
3.3 Επιλογή της περιόδου πρόγνωσης.....	31
3.4 Συνοπτική ανάλυση της περιόδου αναφοράς	34
4 Weather Research & Forecasting Model (WRF)	51
4.1 Τμήματα και υποπρογράμματα του μοντέλου WRF	51
4.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά μοντέλου	54
5. Ανάλυση-Αποτελέσματα.....	60
5.1 Εισαγωγή.....	60
5.2 Spaghetti plots	61
5.3 Στατιστικά μέτρα που χρησιμοποιήθηκαν.....	74
5.4 Περιοχή υπολογισμού των στατιστικών.....	75
5.5 Στατιστική ανάλυση πρώτων 20 προσομοιώσεων (ΜΕΘΟΔΟΣ 1)	77
5.6 Στατιστικά για την Μέθοδο 2 (Θερμοκρασίες θάλασσας που ανανεώνονται μέσα απο εσωτερικές διαδικασίες του μοντέλου)	86

5.7 Στατιστική ανάλυση για την Μέθοδο 3 (persisted ssts anomalies)	89
5.8 Γραφική απεικόνιση στατιστικών μέτρων.....	92
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	100
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	102

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μετεωρολογία ανήκει στις θετικές επιστήμες και είναι ένας κλάδος της Φυσικής ο οποίος έχει ως αντικείμενο έρευνας την ατμόσφαιρα στο σύνολό της καθώς και τα φαινόμενα τα οποία λαμβάνουν χώρα σε αυτή. Η σημασία της στη βελτίωση της ζωής του ανθρώπου είναι προφανής καθώς τα μετεωρολογικά φαινόμενα επηρεάζουν άμεσα την ζωή και τις δραστηριότητές του (Horanont et al. 2013).

Η πρόγνωση καιρού είναι ένας κλάδος της μετεωρολογίας ο οποίος έχει ως στόχο την βραχυπρόθεσμη και μεσοπρόθεσμη γνώση της κατάστασης της ατμόσφαιρας σε κάθε σημείο της Γης. Ως κατάσταση της ατμόσφαιρας σε συγκεκριμένο τόπο και χρόνο νοούνται οι συνθήκες θερμοκρασίας, πίεσης, υγρασίας και ταχύτητας ανέμου που επικρατούν καθώς και η γνώση των μετεωρολογικών φαινομένων που τα συνοδεύουν. Η πρόγνωση καιρού επιτυγχάνεται μέσω αριθμητικών μοντέλων πρόγνωσης (Steppeler et al. 2003). Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιούν το θεωρητικό υπόβαθρο που υπάρχει από τους κλάδους των Μαθηματικών και της Φυσικής, έτσι ώστε να υπολογίσουν τις προγνωστικές μεταβλητές. Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται συστοιχίες υπολογιστών (clusters) καθώς οι υπολογισμοί που πρέπει να γίνουν ανέρχονται σε δισεκατομμύρια.

Στην εργασία αυτή αρχικά παρουσιάζεται η έννοια της ψυχρής εισβολής καθώς και η ατμοσφαιρική κυκλοφορία που οδηγεί σε ψυχρή εισβολή σε μια περιοχή (Ahrens 2013). Στη συνέχεια αναλύεται ο χειμώνας του 2013-2014 για την Ανατολική Βόρεια Αμερική και τα αίτια που οδήγησαν στο δριμύ χειμώνα στα ανατολικά τμήματα της Βορείου Αμερικής (Wang et al. 2014, Lee et al. 2015, Hartmann 2015, Andrew et al. 2015). Στόχος της εργασίας είναι η μελέτη της μεσοπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης προγνωσιμότητας του μοντέλου Global Weather Research and Forecast (GWRP) (Skamarock et al. 2008).

Για το σκοπό αυτό χρειάστηκε να επιλεγεί μια ατμοσφαιρική κυκλοφορία η οποία θα έχει έντονο σήμα και θα είναι μεγάλης κλίμακας. Έτσι από το χειμώνα 2013-2014 ο οποίος χαρακτηρίστηκε από πολλές και έντονες ψυχρές εισβολές επιλέχθηκε η πιο έντονη ψυχρή εισβολή (Ryan et al. 2014). Με τον όρο έντονη εννοούμε και ακραίες τιμές των μετεωρολογικών πεδίων καθώς και μεγάλη διάρκεια της ψυχρής εισβολής. Επιπλέον εκπονείται συνοπτική και δυναμική ανάλυση της συγκεκριμένης ψυχρής εισβολής η οποία αποτελεί και την περίοδο ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια γίνονται προσομοιώσεις του μοντέλου GWRP με χρονική διαφορά μιας μέρας η καθεμία μεταξύ τους με σκοπό την πρόγνωση της περιόδου ενδιαφέροντος. Επιπλέον πραγματοποιούνται προσομοιώσεις με διαφοροποιήσεις στις θερμοκρασίες θάλασσας (SSTs) καθώς οι θερμοκρασίες του Ειρηνικού επηρεάζουν άμεσα την κυκλοφορία στη Βόρεια Αμερική (Lee et al. 2015, Wang et al. 2014). Τέλος υπολογίζονται στατιστικά για την ποσοτικοποίηση της προγνωσιμότητας του μοντέλου και τη σύγκριση των διαφορετικών ειδών προσομοιώσεων.

Εκτός της μελέτης της προγνωσιμότητας του αριθμητικού μοντέλου, στην εργασία γίνεται και μια παρουσίαση των αιτιών οι οποίες οδήγησαν στο συγκεκριμένο μοτίβο κυκλοφορίας στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής, καθώς και προσπάθεια κατανόησης των δυναμικών αιτιών τα οποία οδηγούν το μοντέλο να παρεκκλίνει από την πραγματικότητα καθώς απόμακρονόμαστε από την περίοδο ενδιαφέροντος.

2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

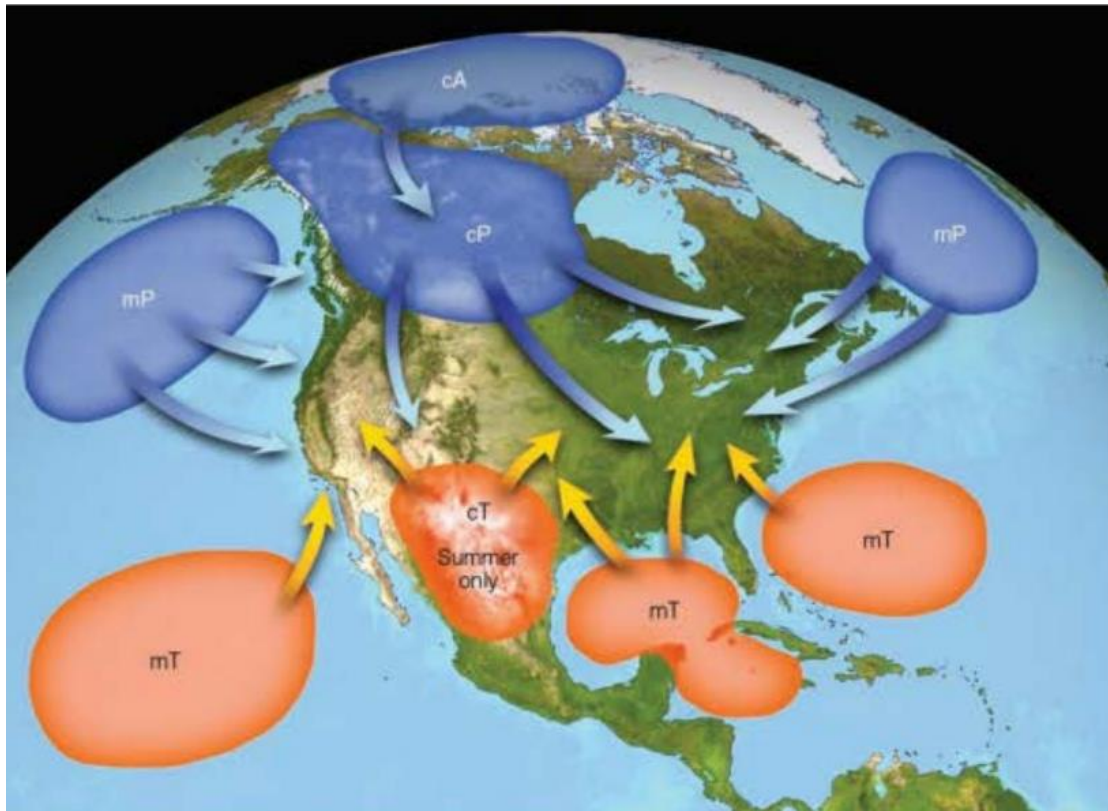
2.1 Αέριες μάζες

Οι θερμές και ψυχρές εισβολές σε μια περιοχή συνδέονται με μεταφορά αερίων μαζών από μια περιοχή σε μια άλλη. Ως αέρια μάζα νοείται ένα μεγάλο τμήμα αέρα το οποίο παρουσιάζει ομοιογένεια ως προς τη θερμοκρασία και υγρασία. Οι αέριες μάζες πολλές φορές καλύπτουν πολύ μεγάλες εκτάσεις. Οι περιοχές στις οποίες δημιουργούνται οι αέριες μάζες ονομάζονται πηγές των αερίων μαζών. Για να δημιουργηθεί μια αέρια μάζα, απαιτείται η περιοχή από την οποία πηγάζει να είναι γενικά επίπεδη και ομοιογενής. Επιπρόσθετα οι επιφανειακοί άνεμοι στην περιοχή οφείλουν να είναι γενικά ασθενείς. Όσο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα παραμένει η αέρια μάζα στην περιοχή δημιουργίας της τόσο απόκτά τα χαρακτηριστικά του εδάφους της περιοχής. Συνεπώς ιδεατές περιοχές για την δημιουργία αερίων μαζών είναι περιοχές που επικρατούν αντικυκλωνικές συνθήκες. Τέτοιες περιοχές είναι οι πόλοι της γης και οι υποτροπικές περιοχές. Στα μέσα γεωγραφικά πλάτη οι επιφανειακές θερμοκρασίες καθώς και η υγρασία παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές σε μικρά χρονικά διαστήματα με αποτέλεσμα οι περιοχές αυτές να μην αποτελούν πηγές αερίων μαζών. Οι περιοχές αυτές αποτελούν ζώνες μετάβασης, όπου αέριες μάζες με διαφορετικά υγροθερμομετρικά χαρακτηριστικά μετακινούνται, συγκρούονται και παράγουν διάφορα μετεωρολογικά φαινόμενα (Ahrens 2013, Holton 2004).

Η ταξινόμηση των αερίων μαζών γίνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία και υγρασία τους, οι οποίες όπως ειπώθηκε και προηγουμένως παραμένουν σχετικά σταθερές στις οριζόντιες διευθύνσεις. Διακρίνονται σε ψυχρές και θερμές αέριες μάζες, ξηρές και υγρές. Χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες. Αυτές που ξεκινούν από τις πολικές περιοχές συμβολίζονται με το κεφαλαίο γράμμα P (polar) (Σχήμα 2.1). Αυτές που ξεκινούν από τις υποτροπικές περιοχές με το κεφαλαίο γράμμα T (tropical). Εάν η περιοχή δημιουργίας τους είναι ξηρά, η αέρια μάζα θα είναι γενικά ξηρή και το πεζό γράμμα c (continental) θα προηγείται του T ή του P (cP ή cT αντίστοιχα). Εάν η πηγή είναι η θάλασσα, το πεζό γράμμα θα είναι το m (mP και mT αντίστοιχα). Η τελευταία κατηγορία είναι η cA και παρατηρείται κατά τους χειμερινούς μήνες με περιοχή δημιουργίας την Αρκτική. Στον πίνακα (2.1) συνοψίζονται και οι πέντε κατηγορίες (Ahrens 2013).

SOURCE REGION	ARCTIC REGION (A)	POLAR (P)	TROPICAL (T)
Land	cA	cP	cT
Continental (c)	extremely cold, dry stable; ice- and snow-covered surface	cold, dry, stable	hot, dry, stable air aloft; unstable surface air
Water		mP	mT
Maritime (m)		cool, moist, unstable	warm, moist; usually unstable

Πίνακας 2.1 : Κατηγορίες και ταξινόμηση αερίων μαζών. Πηγή: (Ahrens 2013).



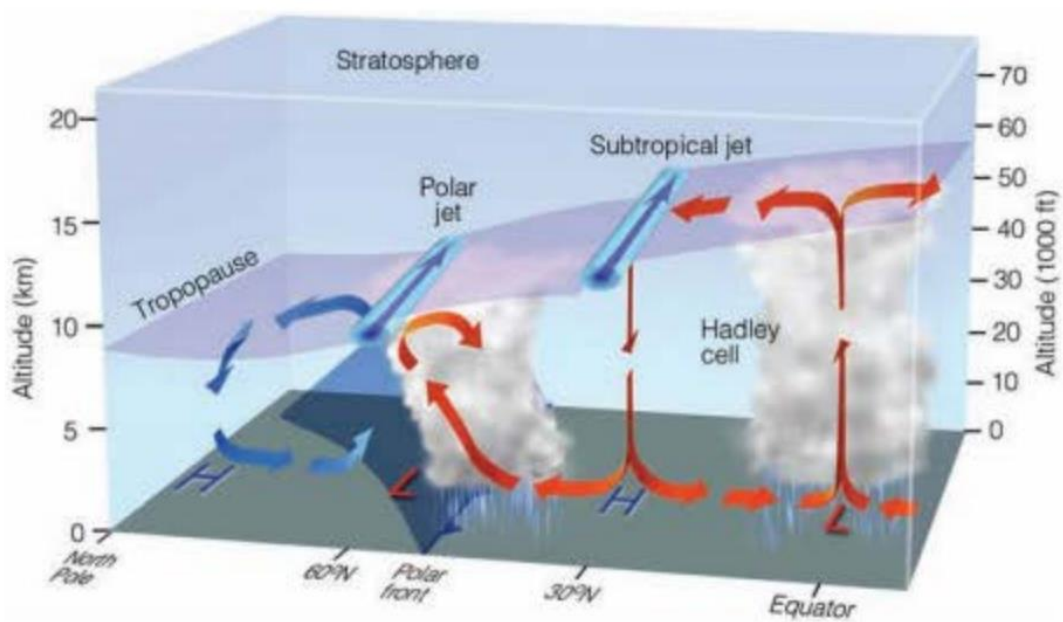
Σχήμα 2.1 : Προέλευση και πορεία αερίων μαζών. Πηγή: (Ahrens 2013)

2.2 Αεροχειμάρροι

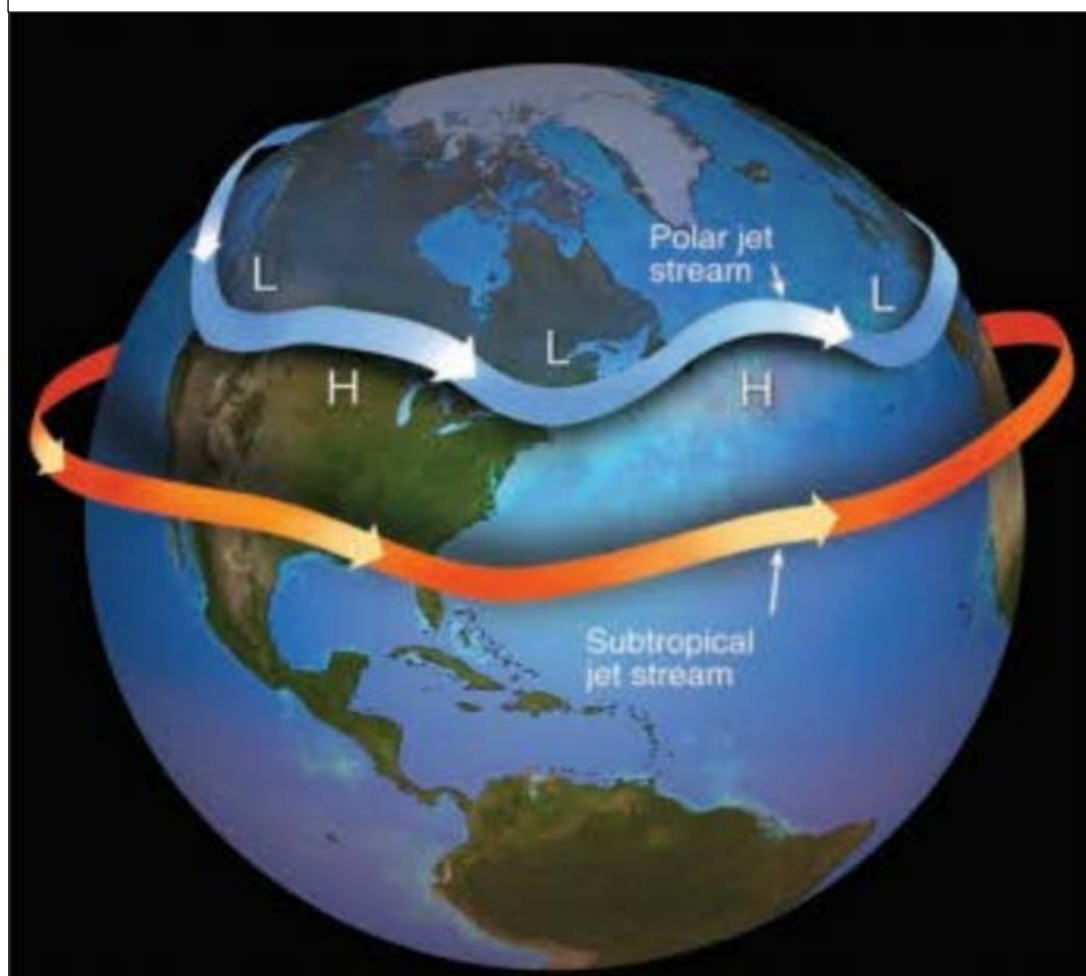
Πώς όμως μεταφέρονται αυτές οι αέριες μάζες από την περιοχή δημιουργίας τους, που κατά κανόνα είναι οι πολικές και υποτροπικές περιοχές, στα μέσα γεωγραφικά πλάτη; Σύμφωνα με τη γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας οι αέριες μάζες χωρίζονται από τους αεροχειμάρρους (jet streams).

Οι αεροχειμάρροι είναι ρεύματα αέρα χιλιάδων χιλιομέτρων σε μήκος μερικών εκατοντάδων χιλιομέτρων πλάτους, και μερικών χιλιομέτρων πάχους. Οι άνεμοι στο κέντρο των αεροχειμάρρων κυμαίνονται μεταξύ 200-400 km/h. Συνήθως εντοπίζονται κοντά στην τροπόπαυση σε ύψη 10-15 Km. Στο βόρειο ημισφαίριο παρατηρείται ο υποτροπικός αεροχειμάρρος και ο πολικός αεροχειμάρρος. Ο πρώτος εντοπίζεται μεταξύ του κυττάρου Hadley και του κυττάρου Ferrel, ενώ ο δεύτερος αντίστοιχα μεταξύ του κυττάρου Ferrel και του πολικού κυττάρου (Σχήμα 2.2).

Η κίνηση των αεροχειμάρρων δεν γίνεται σε σταθερό γεωγραφικό πλάτος αλλά παρουσιάζει κυματισμούς, δηλαδή η κίνηση έχει και μεσημβρινή συνιστώσα (Εικόνα 1.3). Στο βόρειο ημισφαίριο αέρας που πνέει νότια μεταφέρει ψυχρές μάζες σε μικρότερα γεωγραφικά πλάτη, ενώ αέρας που πνέει βόρεια μεταφέρει θερμές αέριες μάζες προς τα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Στις κορυφές των κυμάτων αυτών επικρατούν αντικυκλωνικές συνθήκες και υψηλά βαρομετρικά, ενώ στις κοιλίες παρατηρούνται αυλώνες και ψυχρές αέριες μάζες.



Σχήμα 2.2 : Θέσεις και ύψη υποτροπικού και πολικού αεροχείμαρρου. Πηγή: (Ahrens 2013)



Σχήμα 2.3 : Υποτροπικός και πολικός αεροχείμαρρος. Πηγή: Ahrens 2013.

2.3 Κύματα Rossby

Η ταλάντωση αυτή των αεροχειμάρρων όπως ειπώθηκε δημιουργεί κύματα. Τα κύματα αυτά ονομάζονται κύματα Rossby (Holton 2004, Lin 2007, Bluestein 1992). Παίζουν μεγάλο ρόλο στη διαμόρφωση των καιρικών συνθηκών του πλανήτη και συνήθως είναι από 3 έως 6 γύρω από τη γη. Μεγάλος αριθμός κυμάτων Rossby υποδηλώνει μεσημβρινή κυκλοφορία, ενώ μικρός αριθμός ζωνική κυκλοφορία με δυτικούς ανέμους στα μέσα γεωγραφικά πλάτη.

Τα κύματα Rossby, σε ένα βαροτροπικό ρευστό σταθερού πάχους και χωρίς τριβές, είναι μια κίνηση κατά την οποία διατηρείται ο απόλυτος στροβιλισμός και οφείλουν την ύπαρξή τους στην περιστροφή της γης και την αλλαγή της τιμής δύναμης Coriolis με το γεωγραφικό πλάτος. Σε βαροκλινικές ατμόσφαιρες τα κύματα Rossby είναι κύματα στα οποία διατηρείται ο δυναμικός στροβιλισμός.

Ο απόλυτος στροβιλισμός δίνεται από τη σχέση,

$$\eta = \zeta + f \quad (1)$$

Όπου ζ ο σχετικός στροβιλισμός και, f η παράμετρος Coriolis.

$$f = 2\Omega \sin\varphi \quad (2)$$

Ας θεωρήσουμε ένα τμήμα ρευστού σε γεωγραφικό πλάτος φ την χρονική στιγμή t ότι έχει $\zeta=0 \text{ s}^{-1}$, και ότι την χρονική στιγμή t_1 έχει μετατοπιστεί κατά Δy κατά τη μεσημβρινή διεύθυνση. Ο απόλυτος στροβιλισμός τη χρονική στιγμή t θα είναι,

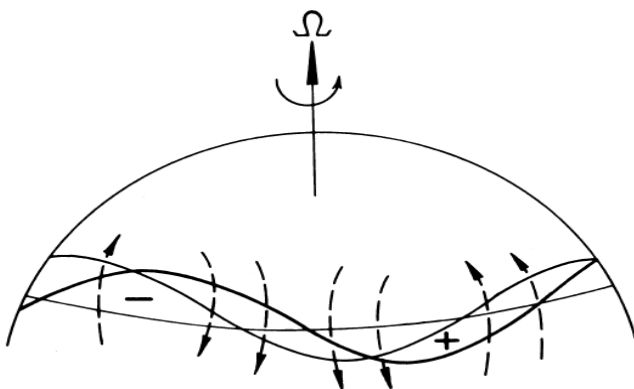
$$(\zeta + f) = f_t \quad (3)$$

Ενώ στην t_1 θα είναι,

$$(\zeta_{t1} + f_{t1}) = f_t$$

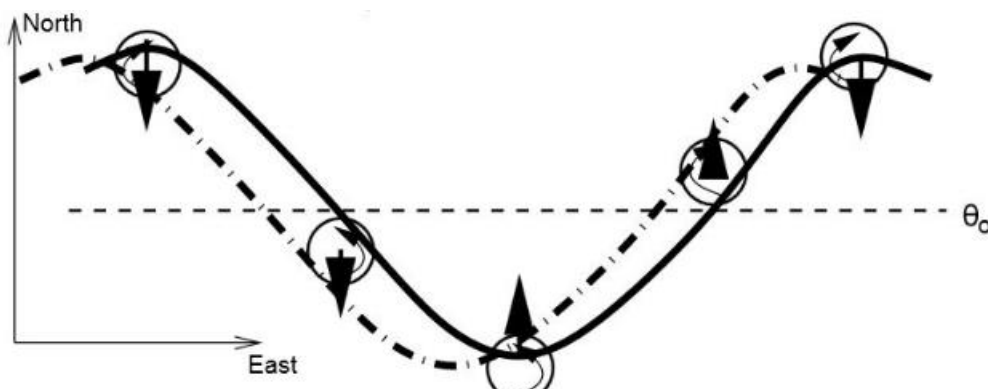
$$\zeta_{t1} = f_t - f_{t1}$$

Από τη σχέση (3) φαίνεται ότι εάν το τμήμα αέρα έχει μετατοπιστεί βορειότερα ο σχετικός στροβιλισμός του θα είναι αρνητικός, ενώ αν έχει μετατοπιστεί νοτιότερα θα είναι θετικός, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.4



Σχήμα 2.4 : Διαταραχή σχετικού στροβιλισμού μετά την μετατόπιση από τη θέση ισορροπίας. Πηγή: Holton 2004

Τα τμήματα αέρα τα οποία είναι μετατοπισμένα βορειότερα και έχουν αρνητικό σχετικό στροβιλισμό θα τείνουν να κινηθούν νοτιότερα έτσι ώστε να διατηρηθεί ο απόλυτος στροβιλισμός, ενώ τα τμήματα που κινήθηκαν νοτιότερα θα τείνουν να κινηθούν βορειότερα. Παράλληλα στα τμήματα θετικού στροβιλισμού θα επικρατούν άνεμοι αριστερόστροφης τροχιάς, ενώ στα αντίστοιχα τμήματα αρνητικού στροβιλισμού, δεξιόστροφης τροχιάς. Έτσι δημιουργούνται τα πλανητικά κύματα Rossby.

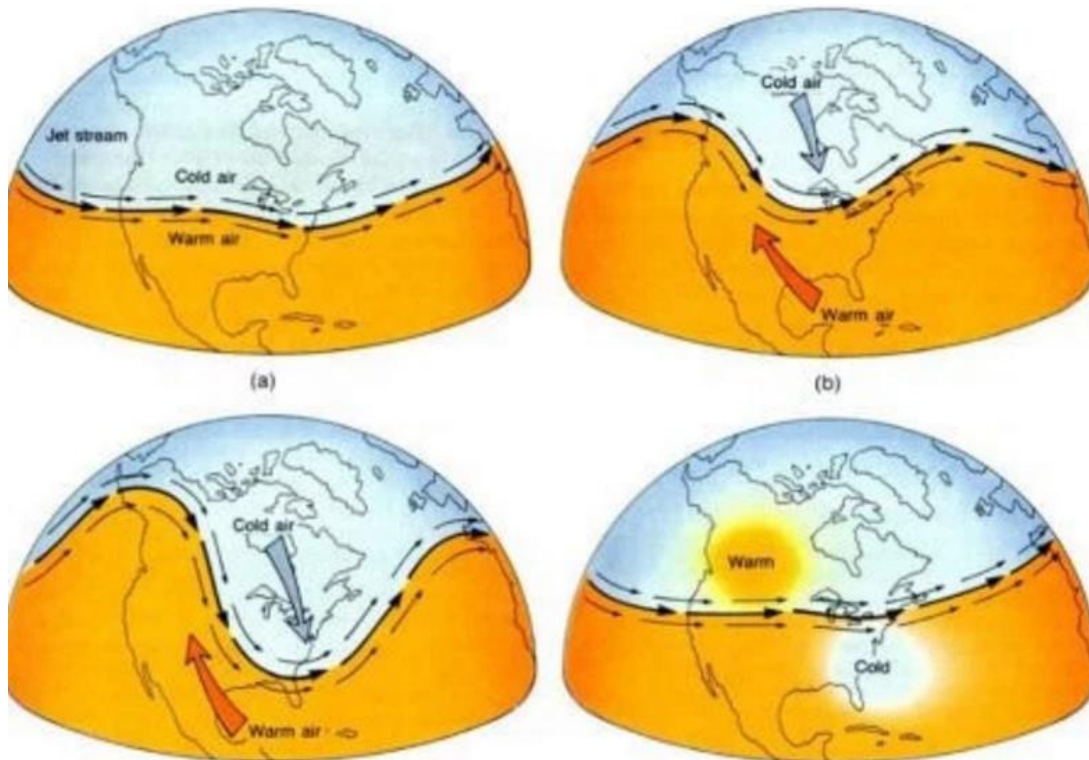


Σχήμα 2.5 : Δυνάμεις επαναφοράς πάνω στα τμήματα αέρα. Πηγή: Holton 2004

Τα τμήματα αέρα που μετακινήθηκαν προς τα βόρεια αύξησαν τον απόλυτο στροβιλισμό και έτσι έχουν αντικυκλωνικό σχετικό στροβιλισμό, ενώ τα τμήματα προς τα νότια μείωσαν τον απόλυτο στροβιλισμό και έτσι έχουν κυκλωνικό σχετικό στροβιλισμό. Στις κορυφές των κυμάτων έχουμε τις ράχες υψηλών γεωδυναμικών υψών και αντικυκλωνικές συνθήκες ενώ στις κοιλίες έχουμε αυλώνες και κυκλωνικές συνθήκες.

2.4 Ψυχρές εισβολές

Συνεπώς οι αέριες μάζες κινούνται από την περιοχή δημιουργίας τους στα μέσα γεωγραφικά πλάτη μέσω της γενικής κυκλοφορίας. Όπως αναφέρθηκε οι ψυχρές αέριες μάζες στο βόρειο ημισφαίριο κατά τους χειμερινούς μήνες πηγάζουν από γεωγραφικά πλάτη άνω των 55-60 μοιρών. Για να κινηθούν αυτές οι αέριες μάζες νοτιότερα καταρχήν επιβάλλεται η επικράτηση μεσημβρινής κυκλοφορίας. Υπό συνθήκες ζωνικής κυκλοφορίας δεν παρατηρούνται έντονοι κυματισμοί των αεροχειμάρρων στην ατμόσφαιρα και οι αέριες μάζες παραμένουν στην περιοχή δημιουργίας τους. Υπό συνθήκες μεσημβρινής κυκλοφορίας στην ατμόσφαιρα εμφανίζονται κυματισμοί των αεροχειμάρρων που το πλάτος τους μπορεί να φτάσει τις αρκετές χιλιάδες χιλιόμετρα (Σχήμα 2.6). Έτσι ο άνεμος εκτός από ζωνική συνιστώσα έχει και μεσημβρινή συνιστώσα με αποτέλεσμα την ανακατανομή αερίων μαζών στα μέσα γεωγραφικά πλάτη. Στις περιοχές που επικρατούν οι ράχες κατά κανόνα παρατηρείται μεταφορά θερμών αερίων μαζών και επικρατούν αντικυκλωνικές συνθήκες. Τα γεωδυναμικά ύψη στις περιοχές αυτές παρουσιάζουν μεγάλες τιμές. Η μεταφορά αυτή θερμότερων αερίων μαζών σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη σε συνδυασμό με την αντικυκλωνική κυκλοφορία προκαλεί την μετατόπιση των ψυχρότερων αερίων μαζών από τις περιοχές αυτές σε νοτιότερες περιοχές. Η μετατόπιση αυτών των ψυχρών αερίων μαζών γίνεται στις κοιλίες των κυμάτων.



Σχήμα 2.6 : Ζωνική (α) και μεσημβρινή (β) κυκλοφορία αντίστοιχα. Πηγή: Bluestein 1992

Οι κοιλίες των κυμάτων αυτών ονομάζονται αυλώνες (troughs). Στις περιοχές αυτές έχουμε ψυχρές αέριες μάζες. Τα γεωδυναμικά ύψη είναι σχετικά χαμηλά καθώς το γεωδυναμικό ύψος εξαρτάται από τη μέση θερμοκρασία του στρώματος του αέρα.

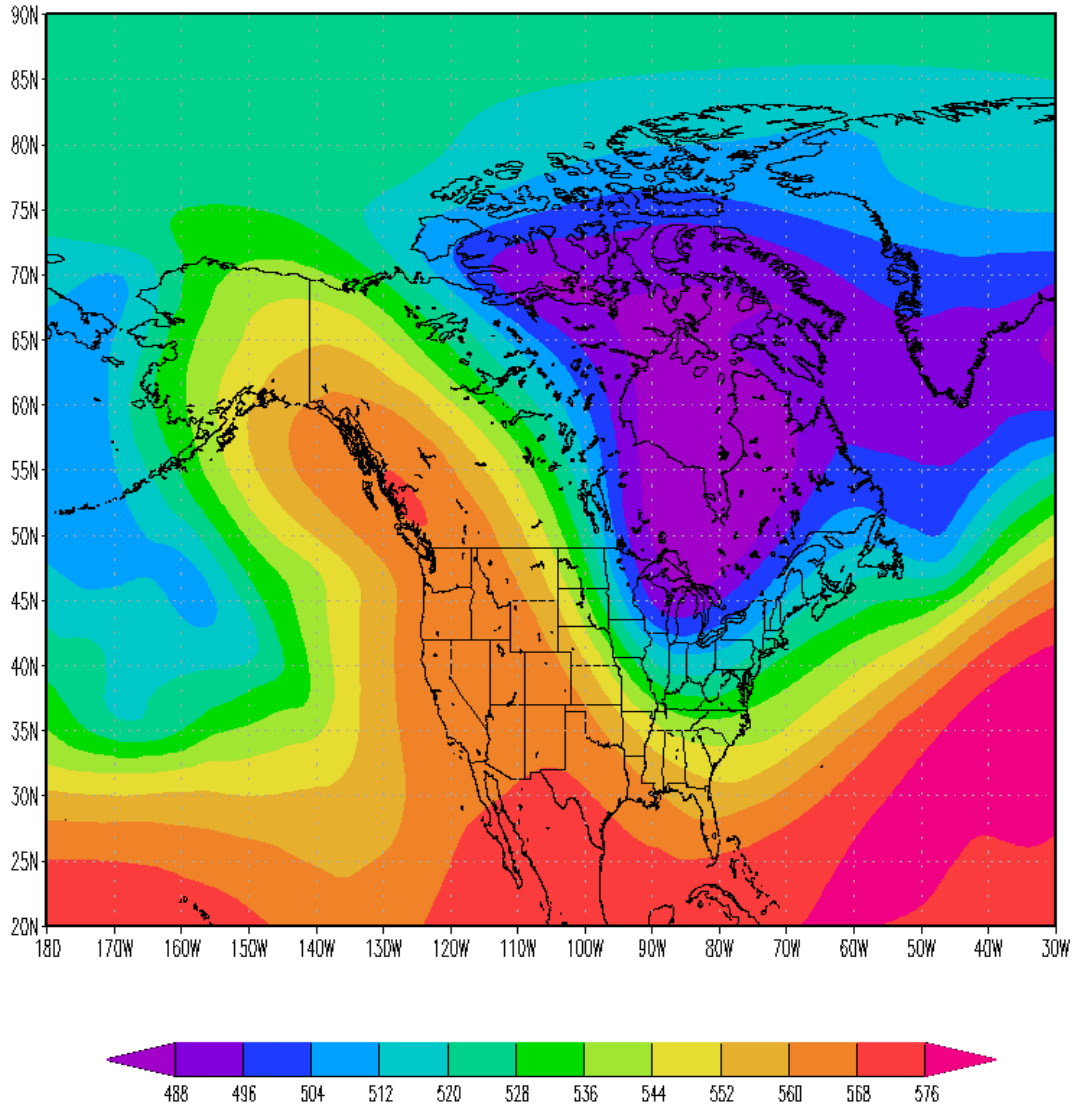
$$H = 29.3 * T * \ln \frac{P_0}{P} \quad (4)$$

Όπου H το γεωδυναμικό ύψος, T η μέση θερμοκρασία του στρώματος αέρα, P_0 η πίεση επιφανείας και P η πίεση της επιφάνειας στην οποία υπολογίζεται το γεωδυναμικό ύψος. Τέλος στις περιοχές αυτές παρουσιάζονται κατά κόρον βαρομετρικά χαμηλά.

2.5 Ψυχρές εισβολές στο Ανατολικό τμήμα της Βόρειας Αμερικής

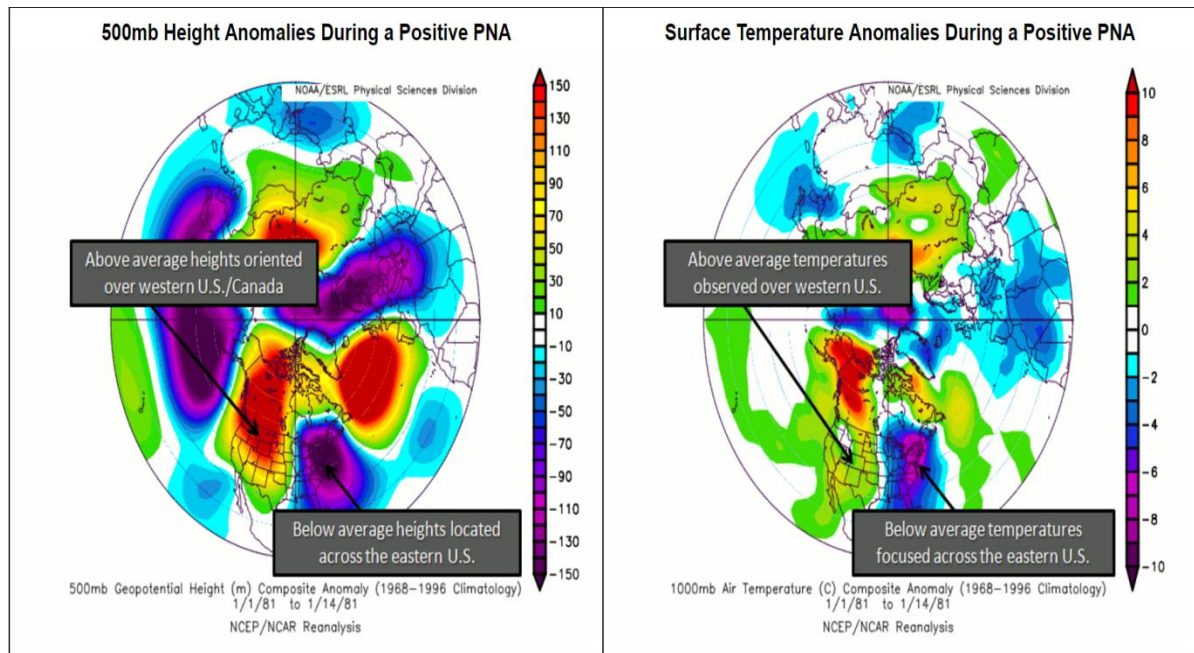
Οι ψυχρές εισβολές στο Ανατολικό τμήμα της Βόρειας Αμερικής σχετίζονται με αέριες μάζες πολικής προέλευσης. Προκειμένου να επιτευχθεί μια ψυχρή εισβολή στο ανατολικό τμήμα των Ηνωμένων Πολιτειών, είναι αναγκαία η παρουσία ράχης στο Δυτικό τμήμα της Βόρειας Αμερικής και σε τμήμα της Αλάσκας όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7.

Geop. Height 500hPa(gpdm) 25/01/2014 12Z

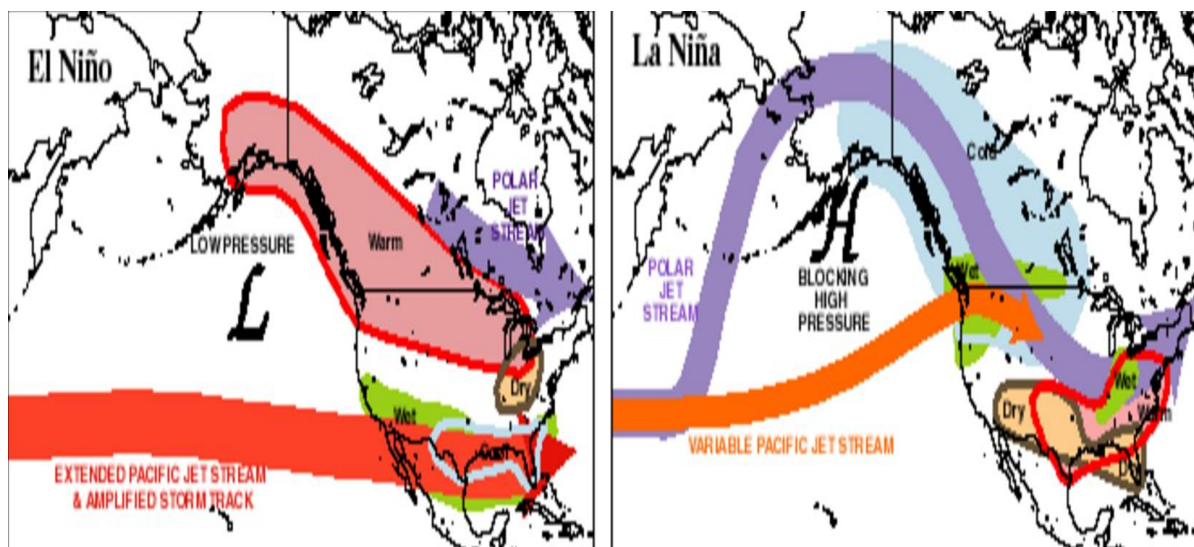


Σχήμα 2.7 : Χάρτης γεωδυναμικών υψών (gpdm) στη Βόρεια Αμερική, 25/01/2014 00Z

Τέτοιου είδους κυκλοφορία συνδέεται άμεσα με θετικές τιμές του Pacific/North American teleconnection pattern - PNA (Panagiotopoulos et al. 2002). Ο PNA είναι ένας δείκτης τηλεσύνδεσης ο οποίος σχετίζεται με τις ανωμαλίες στα γεωδυναμικά ύψη στα 500 ή 700 hPa μεταξύ των Δυτικών και Ανατολικών Ηνωμένων Πολιτειών (Σχήμα 2.8). Μελέτες έχουν δείξει ότι έχει άμεση συσχέτιση με τον ENSO ή EL NINO Southern Oscillation (Σχήμα 2.9, Straus et al. 2002, NCEP). Η θετική φάση του PNA τείνει να συνδέεται με θερμά επεισόδια στον τροπικό Ειρηνικό (EL NINO), ενώ η αρνητική φάση με ψυχρά επεισόδια (LA NINA). Η θετική φάση του PNA συνδέεται με θετικές ανωμαλίες των γεωδυναμικών υψών πάνω από τη Δυτική Βόρεια Αμερική και αντίστοιχα αρνητικές ανωμαλίες γεωδυναμικών υψών πάνω από την Ανατολική Βόρεια Αμερική. Συνεπώς σχετίζεται με αντικυκλωνικές και κυκλωνικές συνθήκες στα Δυτικά και Ανατολικά αντίστοιχα.



Σχήμα 2.8: Θετική φάση του PNA. Πηγή: Image provided by the NOAA/ESRL Physical Sciences Division, Boulder Colorado from their Web site at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>

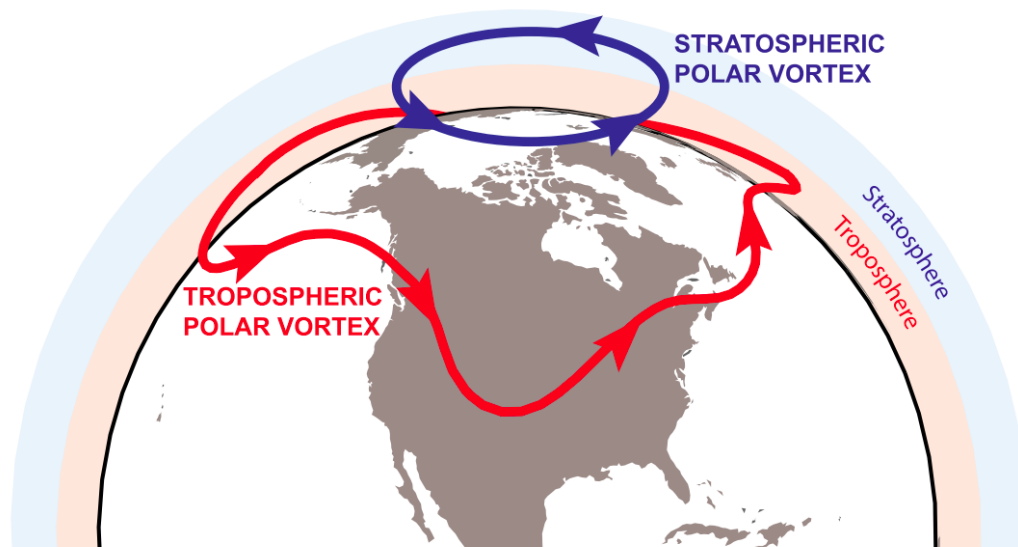


Σχήμα 2.9: Επιπτώσεις ENSO στην Βόρεια Αμερική. Πηγή: Image provided by the NOAA/ESRL Physical Sciences Division, Boulder Colorado from their Web site at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/> , <http://www.cpc.ncep.noaa.gov>

Επιπλέον πιθανό αίτιο δρυμών ψυχρών εισβολών στην περιοχή της Αμερικής είναι η μετατόπιση του τροποσφαιρικού Polar Vortex σε νοτιότερα γεωγραφικά πλάτη. Ως Polar Vortex σύμφωνα με την βιβλιογραφία ορίζεται η δυτική ροή ανέμων σε πλανητική κλίμακα η οποία εμφανίζεται σε μέσα και μεγάλα γεωγραφικά πλάτη (Waugh et al. 2016).

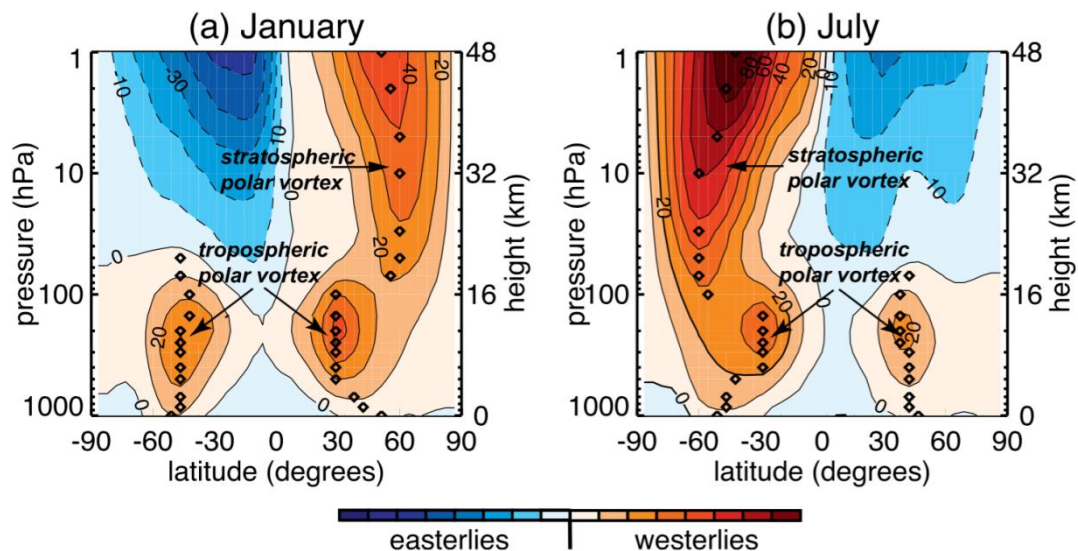
Οι πολικοί στρόβιλοι που εμφανίζονται σε κάθε ημισφαίριο είναι δύο, ο ένας στην τροπόσφαιρα και ο άλλος στη στρατόσφαιρα (Σχήμα 2.10). Παρουσιάζουν διαφορετικά

χαρακτηριστικά όπως δομή, εποχικότητα, δυναμικά χαρακτηριστικά και επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο την ατμοσφαιρική κυκλοφορία και τον καιρό της τροπόσφαιρας.



Σχήμα 2.10: Σχηματική αναπαράσταση του στρατοσφαιρικού (μπλέ χρώμα) και του τροποσφαιρικού (κόκκινο χρώμα) πολικού στρόβιλου. Πηγή: Waugh et al. 2016

Ο στρατοσφαιρικός πολικός στρόβιλος παρουσιάζει το μέγιστό του στη στρατόσφαιρα και σε ύψος περίπου 40 χιλιομέτρων πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (Σχήμα 2.11). Επιπρόσθετα τοποθετείται περίπου σε γεωγραφικό πλάτος 60 μοιρών και βορειότερα, ενώ παρουσιάζει εποχικότητα. Εμφανίζεται μεταξύ μεταξυ φθινοπώρου και άνοιξης και οφείλει την ύπαρξη του στη διαφορική θέρμανση των μέσων και πολικών γεωγραφικών πλατών κατά την περίοδο του χειμώνα.

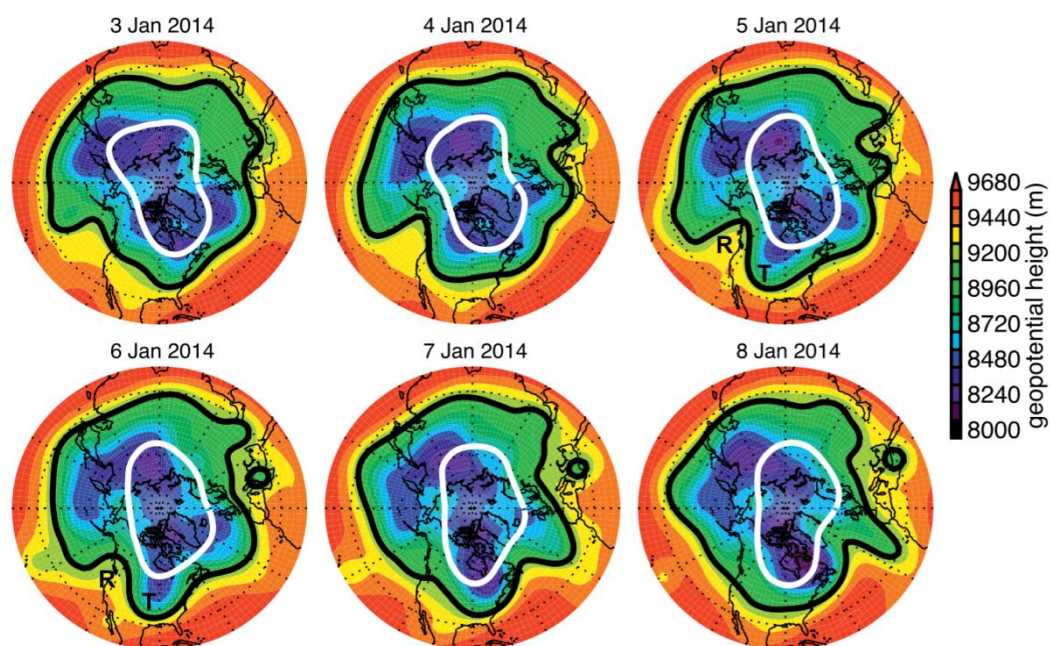


Σχήμα 2.11: Κλιματολογικές τιμές ζωνικού μέσου ανέμου καθ' ύψος για τον Ιανουάριο και τον Ιούλιο. Οι κύκλοι δείχνουν την θέση του μέγιστου του ανέμου σε κάθε διαφορετικό ισοβαρικό επίπεδο. Πηγή: Waugh et al. 2016

Ο τροποσφαιρικός πολικός στρόβιλος είναι αισθητά μεγαλύτερος του στρατοσφαιρικού στρόβιλου. Εμφανίζεται καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου (Σχήμα 2.11) και σε γεωγραφικό

πλάτος απο 40 μέχρι 50 Βόρειο. Η μέγιστη τιμή του εμφανίζεται στη στάθμη των 300hPa δηλαδή περίπου σε ύψος 8-9 χιλιόμετρα πάνω απο την επιφάνεια της θάλασσας. Οφείλεται στη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ ισημερινού και πόλων και σε εποχική κλίμακα παρουσιάζει 1-2 κέντρα στο Βόρειο Ημισφαίριο. Σε ημερήσια κλίμακα μπορεί να παρουσιάζει πολλά κέντρα ειδικά τις περιόδους που είναι εξασθενημένος ή σε περιόδους έντονης μεσημβρινής κυκλοφορίας.

Η συσχέτιση του στρατοσφαιρικού στρόβιλου με ακραία φαινόμενα στην τροπόσφαιρα δεν είναι ακόμα ξεκάθαρη στις διάφορες μελέτες που έχουν γίνει. Αλληλεπίδραση των δύο στρόβιλων μπορεί να υπάρξει (Ambaum and Hoskins 2002) και σε κάποιες συγκεκριμένες περιπτώσεις να επηρεάσει τη γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας και τον καιρό στην επιφάνεια. Κατά κανόνα όμως συσχέτιση με ακραία φαινόμενα εμφανίζει κυρίως ο τροποσφαιρικός στρόβιλος. Η εξάσθενιση του τροποσφαιρικού πολικού στρόβιλου έχει συσχετιστεί απο κάποιες έρευνες με την παρουσία μεσημβρινής κυκλοφορίας και με έντονες ψυχρές εισβολές στα μέσα γεωγραφικά πλάτη (Thompson et al. 2002), αλλά ακόμα ο ακριβής μηχανισμός αλληλεπίδρασης αίτιου-αιτιατού παραμένει ασαφής. Σαφής σύνδεση του τροποσφαιρικού πολικού στρόβιλου και έντονων ψυχρών εισβολών στα μέσα γεωγραφικά πλάτη υπάρχει στις περιπτώσεις όπου έχουμε μετατόπιση κάποιου απο τα κέντρα του σε νοτιότερα γεωγραφικά πλάτη ή σε μετατόπιση του ίδιου σε νοτιότερα γεωγραφικά πλάτη με ταυτόχρονη μετατόπιση πολικών αερίων μαζών σε αυτές τις περιοχές (Σχήμα 2.12) (Francis και Vavrus 2012, Barnes 2013)

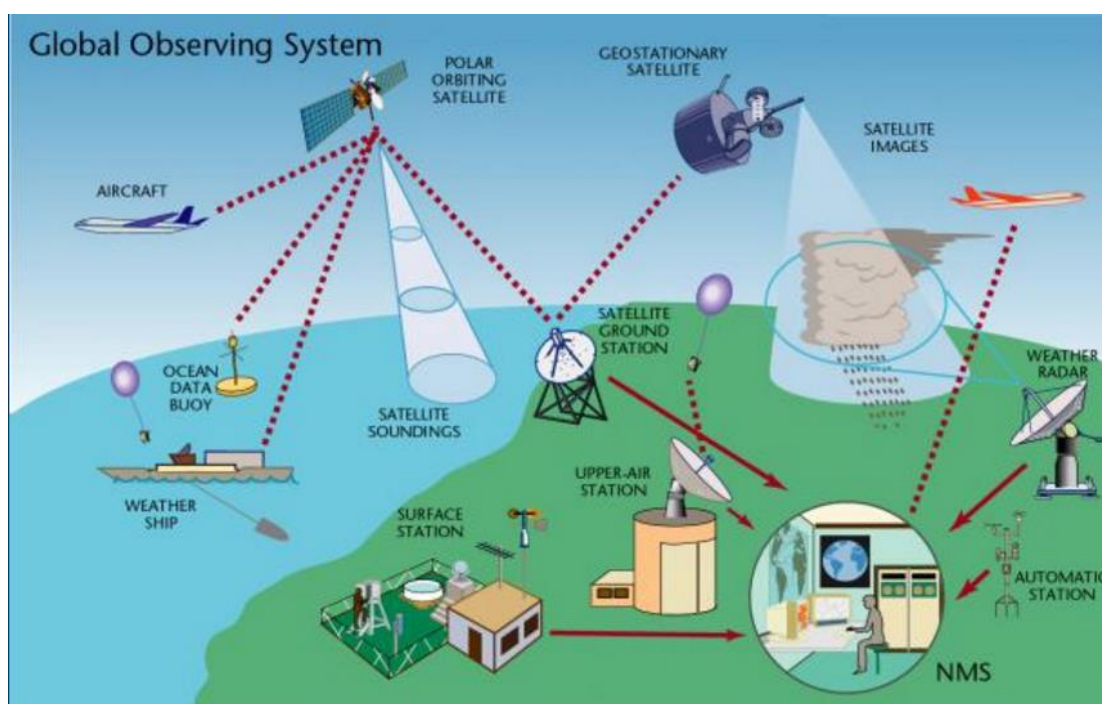


Σχήμα 2.12: Χάρτες γεωδυναμικού ύψους στα 300hPa για την περίοδο 3-8/01/2014. Οι μαύρες γραμμές δείχνουν το άκρο του τροποσφαιρικού πολικού στρόβιλου στα 300hPa ενώ οι άσπρες το άκρο του στρατοσφαιρικού πολικού στρόβιλου στα 50hPa. Πηγή: Waugh et al. 2016

2.6 Πρόγνωση Καιρού

Η πρόγνωση καιρού στοχεύει στη γνώση της γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας σε μελλοντικό χρόνο. Για να επιτευχθεί η πρόγνωση, η δυναμική μετεωρολογία παρέχει τη θεωρητική βάση και μεθοδολογία. Η πρόγνωση καιρού επιτυγχάνεται με τη γνώση της παρούσας κατάστασης μέσω αρχικών συνθηκών των πεδίων που είναι αναγκαία για την επίλυση των βασικών διαφορικών εξισώσεων κίνησης της ατμόσφαιρας. Συνεπώς για μια πρόγνωση μέσω αριθμητικού μοντέλου χρειάζονται αρχικές συνθήκες των μεταβλητών, των προγνωστικών εξισώσεων και μια μέθοδος αριθμητικής ολοκλήρωσης των διαφορικών εξισώσεων προκειμένου να παραχθεί μια μετεωρολογική κατάσταση στο μέλλον.

Οι αρχικές συνθήκες που εισάγονται στα μοντέλα έχουν αρκετές πηγές, όπως επίγειους μετεωρολογικούς σταθμούς, ραδιοβολήσεις, δεδομένα αεροπλάνων, μετρήσεις από δορυφόρους (Σχήμα 2.13).



Εικόνα 2.13: Πηγές μετεωρολογικών δεδομένων. Πηγή: NOAA/ESRL Physical Sciences Division, Boulder Colorado from their Web site at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>

Οι απλοποιημένες προγνωστικές εξισώσεις που χρησιμοποιούν τα μοντέλα πρόγνωσης φαίνονται στο Σχήμα 2.14. Οι εξισώσεις αυτές βασίζονται στους φυσικούς νόμους που διέπουν τις κινήσεις στην ατμόσφαιρα, δηλαδή το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα (διατήρηση της ορμής) και τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο (διατήρηση της ενέργειας). Οι πρώτες δύο εξισώσεις είναι οι προγνωστικές εξισώσεις κίνησης για την οριζόντια και μεσημβρινή συνιστώσα του ανέμου. Στο αριστερό μέλος έχουμε την τοπική μεταβολή της οριζόντιας και μεσημβρινής συνιστώσας του ανέμου, ενώ στο δεξί μέλος οι δύο πρώτοι όροι είναι οι όροι

της οριζόντιας μεταφοράς, ο τρίτος όρος αναφέρεται στην κατακόρυφη μεταφορά, ο τέταρτος (Coriolis) και πέμπτος (βαθμίδα γεωδ. υψών) όρος στην επιτάχυνση του ανέμου λόγω της απόκλισης από τη γεωστροφική ισοδυναμία, ενώ ο τελευταίος είναι ο όρος της τριβής. Περιοχές με οριζόντια απόκλιση θα πρέπει να έχουν κατακόρυφη σύγκλιση και αντίστροφα. Η εξίσωση τρία είναι η προγνωστική εξίσωση της θερμοκρασίας. Είναι ανάλογη της οριζόντιας μεταφοράς του ανέμου, της κατακόρυφης μεταφοράς και αδιαβατικών διαδικασιών, καθώς και διαδικασιών ακτινοβολίας, πήξης-εξάτμισης υδρατμών και άλλων διαβατικών διαδικασιών. Η τέταρτη εξίσωση αφορά τη διατήρηση της υγρασίας, ενώ η τελευταία είναι η εξίσωση της υδροστατικής ισορροπίας

$$\begin{aligned}
 1a. \quad \frac{\partial u}{\partial t} &= -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - \omega \frac{\partial u}{\partial p} + fv - g \frac{\partial z}{\partial x} + F_x \\
 1b. \quad \frac{\partial v}{\partial t} &= -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - \omega \frac{\partial v}{\partial p} - fu - g \frac{\partial z}{\partial y} + F_y \\
 \text{Continuity Equation} \\
 2. \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial p} &= 0 \\
 \text{Temperature Forecast Equation} \\
 3. \quad \frac{\partial T}{\partial t} &= -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} - \omega \left(\frac{\partial T}{\partial p} - \frac{RT}{c_p p} \right) + \frac{H}{c_p} \\
 \text{Moisture Forecast Equation} \\
 4. \quad \frac{\partial q}{\partial t} &= -u \frac{\partial q}{\partial x} - v \frac{\partial q}{\partial y} - \omega \frac{\partial q}{\partial p} + E - P \\
 \text{Hydrostatic Equation} \\
 5. \quad \frac{\partial z}{\partial p} &= - \frac{RT}{pg}
 \end{aligned}$$

Σχήμα 2.14: Προγνωστικές εξισώσεις που διέπουν τις ατμοσφαιρικές κινήσεις. Πηγή: ο <https://www.meted.ucar.edu>

Μέσω των διαγνωστικών εξισώσεων παράγονται οι μελλοντικές τιμές των μετεωρολογικών μεταβλητών. Όμως μερικές μετεωρολογικές διαδικασίες είναι μικρές σε κλίμακα, μικρότερες από τη χωρική διακριτοποίηση του μοντέλου ή η πολυπλοκότητα τους δεν αφήνει περιθώρια άμεσου υπολογισμού τους μέσα από διαγνωστικές εξισώσεις. Για τέτοιες διαδικασίες χρησιμοποιούνται παραμετροποιήσεις. Παραμετροποίηση είναι μια διαδικασία κατά την οποία η πρόγνωση ενός γεγονότος βασίζεται στις τιμές των υπόλοιπων προγνωστικών μεταβλητών. Ένα άμεσο παράδειγμα είναι οι παραμετροποιήσεις για τη φυσική νεφών.

Οι διαφορικές εξισώσεις με τις οποίες αναπαρίσταται η κίνηση και η μεταφορά θερμότητας στην ατμόσφαιρα είναι μη γραμμικές. Αυτό καθιστά την αναλυτική επίλυση τους αδύνατη. Για την επίλυση τους μέσω υπολογιστών χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι, με τις οποίες οι εξισώσεις στην ουσία από συνεχείς γίνονται διακριτές. Η περιοχή ενδιαφέροντος χωρίζεται σε πλεγματικά σημεία τα οποία έχουν κάποια απόσταση μεταξύ τους (χωρική διακριτοποίηση μοντέλου). Οι διαφορικές εξισώσεις λύνονται σε κάθε πλεγματικό σημείο ανά κάποιο σταθερό χρονικό βήμα (χρονικό βήμα μοντέλου) (Lui 2011).

Για την διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων χρησιμοποιείται συνήθως η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών. Οποιαδήποτε συνάρτηση ψ μπορεί να αναπτυχθεί σε σειρά Taylor. Έτσι τα αναπτύγματα της ψ γύρω από ένα σημείο x_0 θα είναι,

$$\psi(x_0 + \delta x) = \psi(x_0) + \psi'(x_0)\delta x + \psi''(x_0)\frac{(\delta x)^2}{2} + O((\delta x)^2) \quad (5)$$

$$\psi(x_0 - \delta x) = \psi(x_0) - \psi'(x_0)\delta x + \psi''(x_0)\frac{(\delta x)^2}{2} + O((\delta x)^2) \quad (6)$$

Αφαιρώντας κατά μέρη μπορούμε να πάρουμε μια παράσταση για την πρώτη παράγωγο

$$\psi'(x_0) = \frac{[\psi(x_0+h) - \psi(x_0-h)]}{2h} + O((h)^2) \quad (7)$$

Με ανάλογο τρόπο μπορεί να προκύψει μια έκφραση για τη δεύτερη παράγωγο,

$$\psi''(x_0) = \frac{[\psi(x_0+h) + \psi(x_0-h) - 2\psi(x_0)]}{h^2} + O((h)^2) \quad (8)$$

Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να αντικατασταθούν όροι διαφορικών από όρους πεπερασμένων διαφορών. Επειδή, για τον υπολογισμό των παραπάνω παραγώγων στο σημείο x_0 , χρησιμοποιείται η πληροφορία από το προηγούμενο και το επόμενο σημείο, ονομάζονται εξισώσεις κεντρικών διαφορών.

Ένα απλό παράδειγμα είναι η εξίσωση της γραμμικής μεταφοράς,

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{c \partial q}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

Με αντικατάσταση των διαφορικών από τις πεπερασμένες διαφορές προκύπτει (σε μια διάσταση του χώρου), $[q(x, t + \delta t) - q(x, t - \delta t)] / (2\delta t) = -c [q(x + \delta x, t) - q(x - \delta x, t)] / (2\delta x)$ (10)

από την οποία μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή της μεταβλητής q σε ένα σημείο συναρτήσει της τιμής σε γειτονικά. Η επίλυση των εξισώσεων με αυτή την μέθοδο εισάγει περιορισμούς στο χωρικό καθώς και χρονικό βήμα επιλογής καθώς οι λύσεις είναι ευσταθείς μόνο για ορισμένους συνδυασμούς χρονικού βήματος και πλεγματικών απόστάσεων. Αστάθεια στις λύσεις οδηγεί σε απειρισμούς των πεδίων. Το κριτήριο ευστάθειας δίνεται από τη σχέση Courant-Friedrichs-Levy (CFL) (Courant et al. 1967),

$$\frac{c\delta t}{\delta x} \leq 1 \quad (11)$$

Δηλαδή προκειμένου να υπάρχει ευστάθεια στις αριθμητικές λύσεις για μια τιμή χωρικής ανάλυσης, είναι επιτρεπτό ένα ορισμένο εύρος τιμών χρονικού βήματος.

2.7 Σφάλματα μοντέλων

Ως μοντέλο ορίζεται μια προσπάθεια αναπαράστασης μιας φυσικής διεργασίας. Η αναπαράσταση σχεδόν ποτέ δεν αντικατοπτρίζει πλήρως την πραγματικότητα εκτός και αν το πρόβλημα είναι πολύ απλό. Στα μοντέλα καιρού εισάγονται σφάλματα τα οποία σε συνδυασμό με τη χαοτική φύση των προγνωστικών εξισώσεων περιορίζουν την ικανότητα πρόγνωσης στις πέντε με έξι μέρες (Buizza 2014). Τα σφάλματα αυτά έχουν πολλές πηγές (Buizza 2014).

Το πρώτο είδος σφάλματος είναι τα σφάλματα στις αρχικές συνθήκες. Αυτά μπορεί να προέρχονται είτε από έλλειψη παρατηρήσεων σε μια περιοχή, για παράδειγμα στους ωκεανούς το δίκτυο παρατηρήσεων δεν είναι τόσο πυκνό όσο στην ξηρά, είτε από σφάλματα των οργάνων μέτρησης, καθώς οι τιμές των πεδίων από τα όργανα έχουν μια συγκεκριμένη ακρίβεια. Τέλος, επειδή πριν εισαχθούν οι παρατηρήσεις ως αρχικές συνθήκες στο μοντέλο πρόγνωσης περνούν τη διαδικασία γνωστή ως αφομοίωση δεδομένων, σφάλματα σε αυτήν τη διαδικασία εισάγονται στο μοντέλο.

Ένα άλλο είδος σφάλματος εισάγεται από τις προγνωστικές εξισώσεις που υπολογίζουν τα μοντέλα καιρού. Οι εξισώσεις αυτές είναι απλοποιημένες μορφές των φυσικών νόμων που διέπουν την κίνηση της ατμόσφαιρας. Επίσης η γνώση μας γύρω από τους νόμους που διέπουν την ατμόσφαιρα δεν είναι πλήρης με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ακριβής μαθηματικός φορμαλισμός για πολλές διαδικασίες. Τέλος, η επίλυση των εξισώσεων μη αναλυτικά και με αριθμητικές μεθόδους εισάγει επιπλέον σφάλματα.

Επιπλέον σφάλματα προκύπτουν λόγω των παραμετροποιήσεων για πολλές φυσικές διεργασίες όπως τα νέφη, η τυρβώδης ροή, η κατακόρυφη μεταφορά λόγω αστάθειας κλπ. Παραμετροποίηση μιας διαδικασίας είναι η αναπαράσταση της μέσω ήδη γνωστών προγνωστικών μεταβλητών καθώς είναι αδύνατη η αυτόνομη αναπαράσταση της στο χώρο εργασίας και επίλυσης του προβλήματος (Design space). Οι παραμετροποιήσεις διαδικασιών εμπεριέχουν υποθέσεις και προσεγγίσεις με αποτέλεσμα την μη ακριβή αναπαράσταση αυτών.

Τέλος σφάλματα προκύπτουν λόγω της χωρικής διακριτοποίησης του μοντέλου. Πολλές διαταραχές στην ατμόσφαιρα είναι πολύ μικρής κλίμακας και δεν μπορούν να αναλυθούν με τις αναλύσεις που χρησιμοποιούνται στην πρόγνωση καιρού. Συγχρόνως, η χωρική διακριτοποίηση θέτει ένα όριο στη δυνατότητα αναπαράστασης των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών της περιοχής ολοκλήρωσης του μοντέλου.

2.8 Στοχαστική πρόγνωση - Μέθοδος LAF

Τα σφάλματα που εισάγονται στο μοντέλο περιορίζουν την ικανότητα πρόγνωσης του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, από ένα χρονικό διάστημα και μετά συνήθως πέντε ημερών, η πρόγνωση βασικών παραμέτρων σε μικρή κλίμακα όπως η θερμοκρασία μιας περιοχής ή ο υετός να είναι σχεδόν αδύνατο να προβλεφθούν. Μεσοπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες προγνώσεις άνω των 10-15 ημερών γίνονται σε ερευνητικό επίπεδο και επιχειρησιακό επίπεδο για τη βελτίωση των μοντέλων καθώς και την πρόγνωση μεγάλης κλίμακας φαινομένων όπως η γενική κυκλοφορία. Στατιστικές μέθοδοι εφαρμόζονται κυρίως για την αξιολόγηση αυτών των

προγνώσεων, αλλά και για την πληρέστερη παρουσίασή τους. Επίσης στις μακροπρόθεσμες προγνώσεις σχεδόν ποτέ δε γίνεται μια προσομοίωση, λόγω μεγάλης αβεβαιότητας. Γίνεται μεγάλο δείγμα προσομοιώσεων (Ensemble Forecast) πολλές φορές με διαταραχή των αρχικών συνθηκών ή ακόμα και επιλεγμένων παραμέτρων των παραμετροποιήσεων. Έτσι παρέχεται και ένα δείγμα της αβεβαιότητας της πρόγνωσης. Προκύπτει λοιπόν ένα είδος στοχαστικής πρόγνωσης μέσω ντετερμινιστικών προσομοιώσεων.

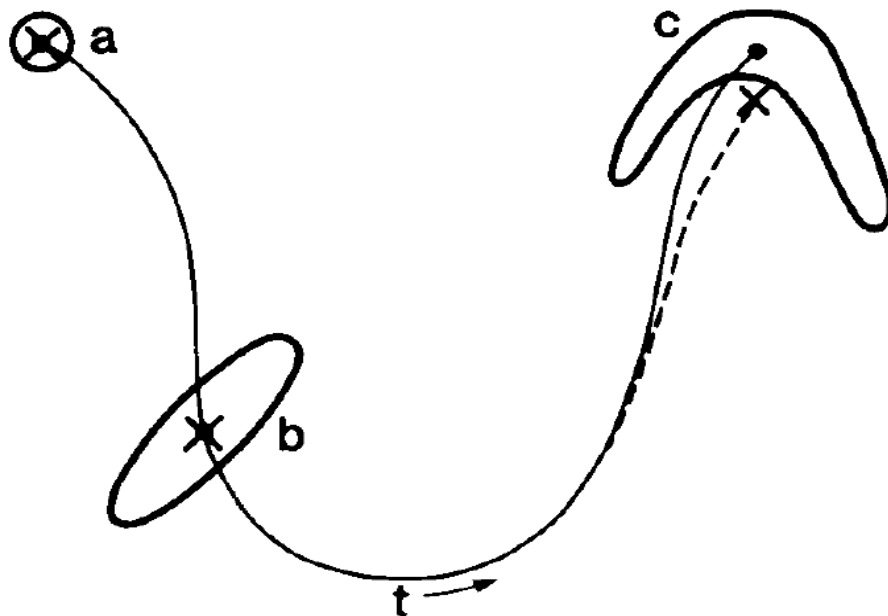
Μια ευρέως γνωστή στοχαστική μέθοδος πρόγνωσης είναι η LAF (Lagged Average Forecast, Hoffman and Kalnay 1983). Η μέθοδος LAF έχει πολλά κοινά χαρακτηριστικά με την μέθοδο Monte Carlo και παίρνει ένα δείγμα στατιστικών από διαδοχικές προσομοιώσεις (ensemble forecasting). Κάθε διαφορετική προσομοίωση είναι και μια ντετερμινιστική πρόγνωση. Οι διαδοχικές προσομοιώσεις απέχουν ένα σταθερό χρονικό βήμα η μια από την άλλη,

$$t = 0, -\tau, -2\tau, \dots - (N - 1)\tau \quad (12)$$

για N διαφορετικές προσομοιώσεις. Με τ συμβολίζεται η χρονική απόσταση αρχικοποίησης δύο διαδοχικών προσομοιώσεων.

Μια πιθανοκρατική προσέγγιση της πρόγνωσης έχει κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με μια ντετερμινιστική. Αρχικά θεωρώντας ότι έχουμε μη γραμμική εξέλιξη του σφάλματος στα μοντέλα, από μια χρονική στιγμή και μετά βελτιώνεται η ικανότητα πρόγνωσης. Επίσης μέσω της προγνωστικής διασποράς γύρω από το μέσο όρο παρέχεται μια εκτίμηση της ικανότητας πρόγνωσης. Τέλος μέσω της συμμεταβλητότητας του προγνωστικού σφάλματος είναι δυνατή η βελτίωση του κλάδου της αφομοίωσης δεδομένων.

Μια πιο κατανοητή εξήγηση των παραπάνω μπορεί να δοθεί μέσω ενός σχήματος στο χώρο των φάσεων. Κάθε σημείο στο χώρο των φάσεων αντικατοπτρίζει μια κατάσταση του μοντέλου (Σχήμα 2.15).

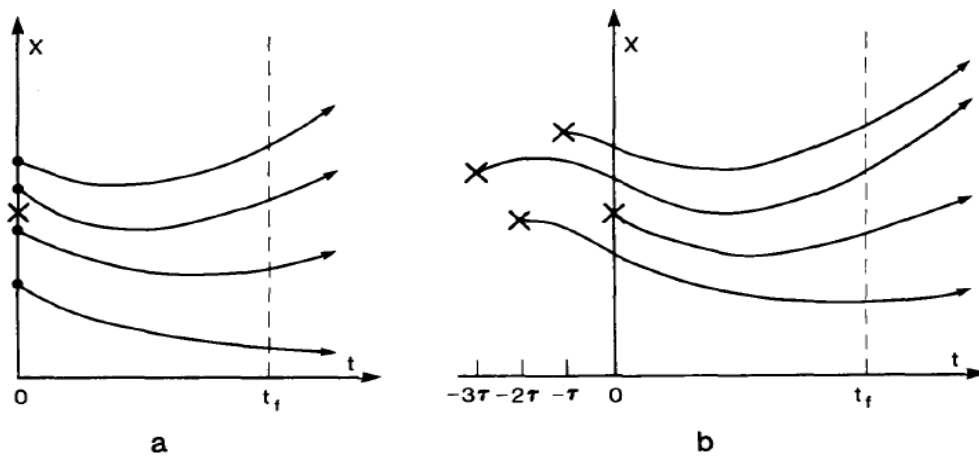


Σχήμα 2.15: Χώρος φάσεων και εξέλιξη μιας ντετερμινιστικής πρόγνωσης (σύμβολο η τελεία) και ενός δείγματος προσομοιώσεων με διαφορά στις αρχικές συνθήκες). Πηγή: Hoffman and Kalnay 1983

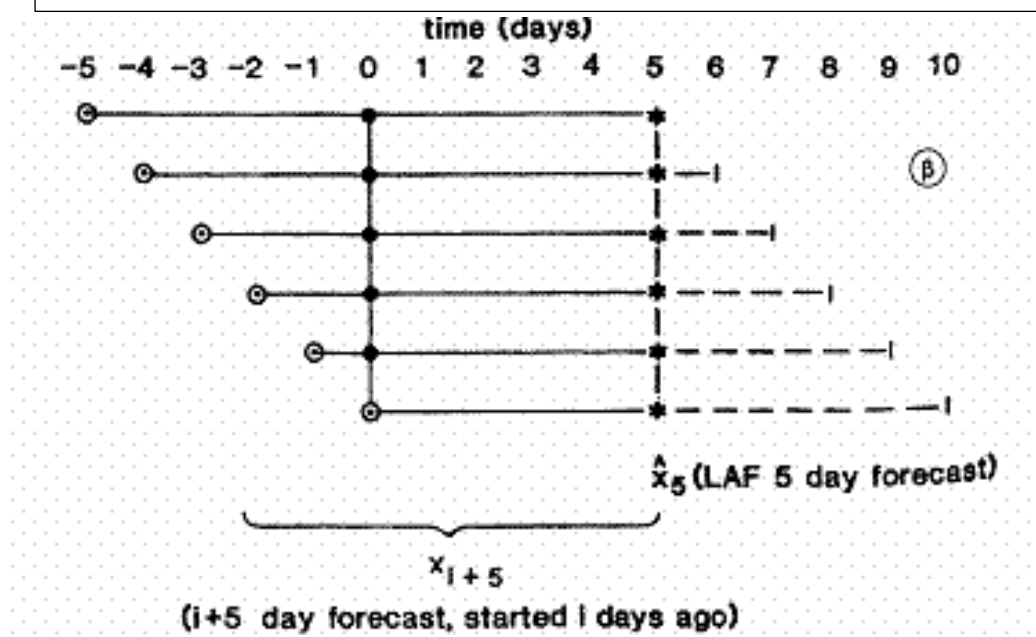
Καθώς το μοντέλο εξελίσσεται οδηγείται και σε μια διαφορετική κατάσταση σε κάθε χρονική στιγμή. Το σύνολο των σημείων για ένα χρονικό διάστημα δημιουργούν μια τροχιά στο χώρο των φάσεων. Θεωρώντας ένα συγκεκριμένο σημείο a (στο σχήμα) ως αρχική συνθήκη και ένα δείγμα σημείων ομοιόμορφα κατανεμημένα σε ένα κύκλο γύρω από το a , τα οποία αποτελούν τα ensembles. Η πρόγνωση που άρχισε από το σημείο a είναι η κεντρική πρόγνωση (central forecast), ενώ ο μέσος όρος των προγνώσεων που άρχισαν από τα σημεία του κύκλου είναι η ensemble forecast. Για μικρά χρονικά διαστήματα έως το b η μη γραμμικότητα του σφάλματος και των όρων των εξισώσεων είναι αμελητέα και ο μέσος όρος των διαφορετικών προσομοιώσεων οδηγεί στην κεντρική πρόγνωση. Για μεγαλύτερους χρόνους πρόγνωσης η κεντρική πρόγνωση και η ensemble forecast διαφέρουν καθώς η μη γραμμικότητα κυριαρχεί και το δείγμα των ensemble χάνει τη συμμετρία του. Αν θεωρηθεί ότι όλα τα σημεία του κύκλου στην αρχική κατάσταση είναι ισοπίθανα στο να είναι αρχικές καταστάσεις για χρονικά διαστήματα μικρότερα του b η καλύτερη πρόγνωση είναι η κεντρική καθώς ελαχιστοποιεί το τετραγωνικό προγνωστικό σφάλμα. Ωστόσο το δείγμα προγνώσεων περιέχει περισσότερες πληροφορίες. Η ensemble forecast είναι καλύτερη πρόγνωση από τη στιγμή που αρχίζουν και κυριαρχούν οι μη γραμμικοί όροι και η διασπορά των ensembles είναι ένα δείγμα της προγνωστικής ικανότητας. Έτσι η χρησιμοποίηση μεγάλου δείγματος προγνώσεων αντί για μία πρόγνωση παρέχει καλύτερη προγνωστική ικανότητα.

Η διαφορά της LAF από τη μέθοδο Monte Carlo έγκειται στο ότι στη μέθοδο monte carlo όλα τα δείγματα προγνώσεων ξεκινούν την ίδια χρονική στιγμή (Σχήμα 2.16). Στη μέθοδο monte carlo ένα δείγμα N αρχικών καταστάσεων διαλέγονται τυχαία μέσα από ένα δείγμα πιθανών αρχικών καταστάσεων το οποίο κατανέμεται μέσω μιας συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (probability density function). Κάθε μέρος του δείγματος ολοκληρώνεται στο χρόνο και ολόκληρο το δείγμα προγνώσεων χρησιμοποιείται για την παραγωγή στατιστικών τη χρονική στιγμή που θέλουμε την πρόγνωση. Όμως υπάρχουν δυσκολίες στην εφαρμογή της μεθόδου monte carlo. Η κύρια δυσκολία είναι ο τρόπος ορισμού της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας για τις αρχικές συνθήκες, καθώς και ότι δε γίνεται χρήση της κεντρικής πρόγνωσης, επειδή οι N αρχικές καταστάσεις προκύπτουν τυχαία μέσω της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας.

Η μέθοδος LAF (Σχήμα 2.17) δεν εμπεριέχει αυτές τις δυσκολίες ενώ έχει τα βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου monte carlo, δηλαδή τα στατιστικά προκύπτουν μέσω ενός δείγματος προγνώσεων. Επίσης όλα τα δείγματα της μεθόδου LAF είναι πραγματικές αρχικές συνθήκες οι οποίες προέκυψαν από παρατήρηση. Έτσι κάθε διαφορετική πρόγνωση της μεθόδου LAF μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια διατάραξη στις αρχικές συνθήκες της πρώτης χρονικά.



Σχήμα 2.16: Μέθοδοι (α) monte carlo MCF και (β) , LAF . Πηγή: Hoffman and Kalnay 1983



Σχήμα 2.17: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου LAF. Πηγή: Hoffman and Kalnay 1983

2.7 Ακραία καιρικά φαινόμενα και μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη προγνωση τους

Ως ακραία καιρικά φαινόμενα χαρακτηρίζονται μετεωρολογικά φαινόμενα στα οποία παρατηρούνται τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων οι οποίες είναι ασυνήθιστες, εμφανίζονται σπάνια και αντιστοιχούν στις χαμηλότερες ή υψηλότερες παρατηρηθείσες μετρήσεις σε μια περιοχή. Η περιοχή αυτή μπορεί να έχει απο μικρές διαστάσεις (για παράδειγμα μια έντονη καταιγίδα που αφήνει πολύ μεγάλα ποσά νετού σε μια περιοχή) έως και διαστάσεις που καλύπτουν ολόκληρες ηπείρους (στην περίπτωση εκτεταμένων καυσώνων ή ψυχρών εισβολών). Έτσι ακραία καιρικά φαινόμενα μπορεί να είναι ένα πλήθος καταστάσεων της ατμόσφαιρας όπως ένας καύσωνας, μια ψυχρή εισβολή, ένα έντονο επεισόδιο βροχής, επεισόδια ξηρασίας, ασυνήθιστα ισχυροί άνεμοι κλπ (WMO 2016).

Η κατάταξη ενός καιρικού γεγονότος ως ακραίο διαφέρει από περιοχή σε περιοχή και έχει να κάνει με διάφορους κλιματικούς δείκτες καθώς και με την ένταση του γεγονότος, την έκταση του, την διάρκεια του και τις συνέπειες του στην κοινωνία (WMO 2016). Οι συνέπειες αυτές μπορούν να είναι οικονομικές καθώς και κοινωνικές. Η σπανιότητα αυτών των ακραίων φαινομένων καθώς και η μη προβλεψιμότητά τους και οι μεγάλες συνέπειες τους στην κοινωνία τα καθιστούν αντικείμενο έρευνας για πολλούς επιστήμονες (IPCC 2007, IPCC 2013). Παραδείγματος χάρη ο καύσωνας του 2003 στην Ευρώπη άφησε πίσω του περισσότερους από 70000 νεκρούς. Την ίδια στιγμή ο τυφώνας κατρίνα άφησε πίσω του ζημιές οι οποίες κοστολογούνται σε περισσότερα από 150 δισεκατομμύρια δολάρια.

Τα ανωτέρω κάνουν σαφές ότι η πρόγνωση των ακραίων γεγονότων είναι πολύ σημαντική έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι συνέπειες που έχουν αυτά στην κοινωνία. Ο κλάδος μεσοπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης πρόγνωσης ακραίων καιρικών φαινομένων είτε αυτά είναι μέσης ή συνοπτικής ή μικρής κλίμακας είναι ένας ευρέως αναπτυσσόμενος κλάδος (Pepler et al. 2014, Vitart et al. 2018). Η μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη πρόγνωση αυτών των γεγονότων γίνεται ή μέσω μοντέλων καιρού ή μέσω της πρόγνωσης δεικτών τηλεσύνδεσης οι οποίοι έχουν αργή χρονική μεταβολή, όπως ο ENSO (Bunzel et al. 2018, Alessandri et al. 2011, Barnston et al. 2003, Cottrill et al. 2013, Graham et al. 2000). Τα μοντέλα πρόγνωσης που χρησιμοποιούνται για την μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη πρόγνωση καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος από περιοχικά, που αναφέρονται στην πρόγνωση ενός γεγονότος μικρής κλίμακας σε μια συγκεκριμένη περιοχή, έως παγκόσμια μοντέλα πρόγνωσης τα οποία έχουν ως στόχο την πρόγνωση φαινομένων συνοπτικής και μέσης κλίμακας (Katsafados et al. 2005, Katsafados et al. 2014, Weisheimer et al. 2003, P.M. Della-Marta et al. 2007).

Έτσι ο σκοπός της παρούσης εργασίας είναι να εξετάσει την μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη προγνωσιμότητα ενός φαινομένου συνοπτικής κλίμακας πάνω από την Αμερική το οποίο είχε μεγάλη διάρκεια κατά τον χειμώνα 2013-2014 και παρουσίασε μεγάλη ένταση. Η μελέτη αυτή γίνεται με τον παγκόσμιο μοντέλο πρόγνωσης Global Weather Forecasting System (GWRF) και αποσκοπεί στην εκτίμηση και αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου κυρίως σε μεσοπρόθεσμη βάση, κάτι το οποίο δεν έχει εξετασθεί ευρέως και δεν παρουσιάζει μεγάλη ανάλυση στην βιβλιογραφία.

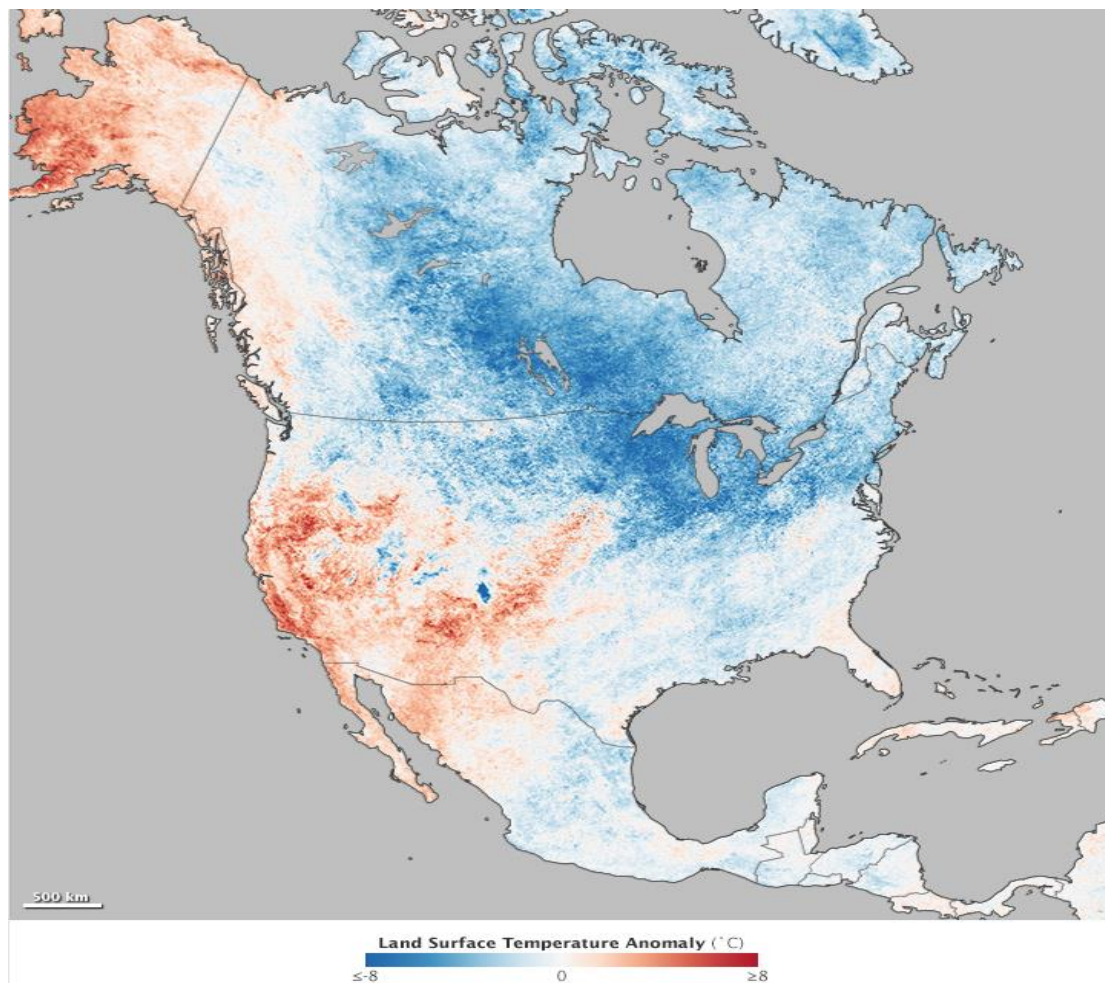
3 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ-ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

3.1 Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η μελέτη της μεσοπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης προγνωσιμότητας του μοντέλου GWRF. Για το σκοπό αυτό πρώτο μέλημα ήταν η εύρεση της περιόδου ενδιαφέροντος καθώς και η εύρεση του γεγονότος γύρω από το οποίο θα εστιαστεί η μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη πρόγνωση. Το γεγονός αυτό έπρεπε να πληρεί κάποια βασικά χαρακτηριστικά, καθώς η μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη πρόγνωση δεν μπορούν να εστιαστούν σε πολύ μικρές περιοχές ούτε σε γεγονότα μικρής κλίμακας, όπως για παράδειγμα μια καταιγίδα. Έτσι το γεγονός αυτό θα έπρεπε να είναι συνοπτικής και μέσης κλίμακας. Η περιοχή που επιλέχθηκε είναι η βόρεια Αμερική και η περίοδος είναι ο χειμώνας του 2013-2014 (WMO 2016). Το γεγονός μελέτης ήταν μια έντονη ψυχρή εισβολή στο Ανατολικό τμήμα της Βορείου Αμερικής, ενώ ταυτόχρονα συνυπήρχαν μεγάλες θερμές αποκλίσεις στο Δυτικό τμήμα αυτής.

3.2 Χαρακτηριστικά χειμώνα 2013-2014 Βόρεια Αμερική

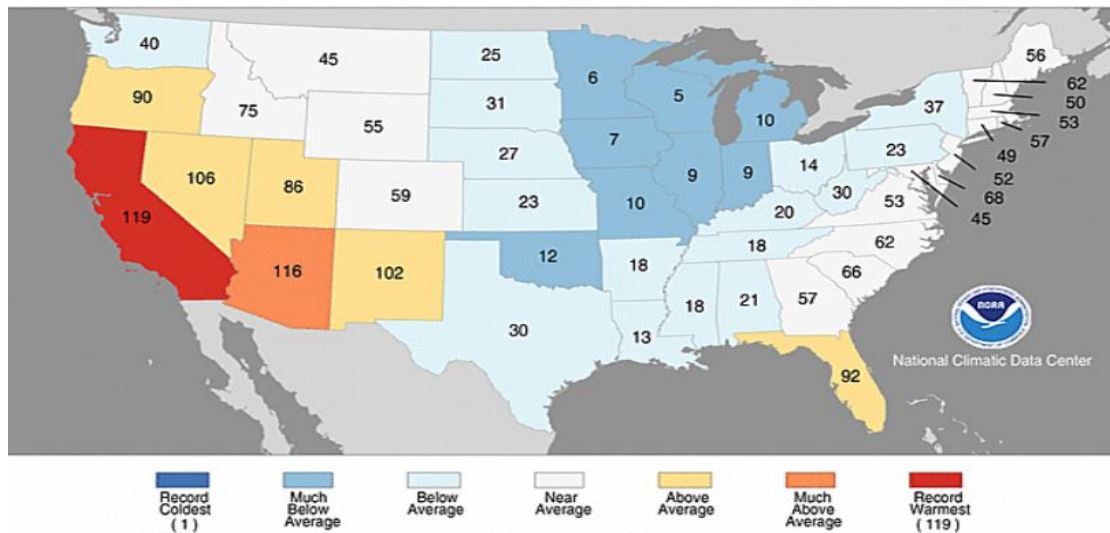
Ο χειμώνας του 2013-2014 χαρακτηρίστηκε από αρκετές ψυχρές εισβολές στα κεντρικά και ανατολικά τμήματα της βόρειας Αμερικής (Ryan et al. 2014), ενώ ταυτόχρονα θετικές αποκλίσεις θερμοκρασιών παρουσιάστηκαν στις δυτικές ακτές και την Αλάσκα (Εικόνα 3.1)



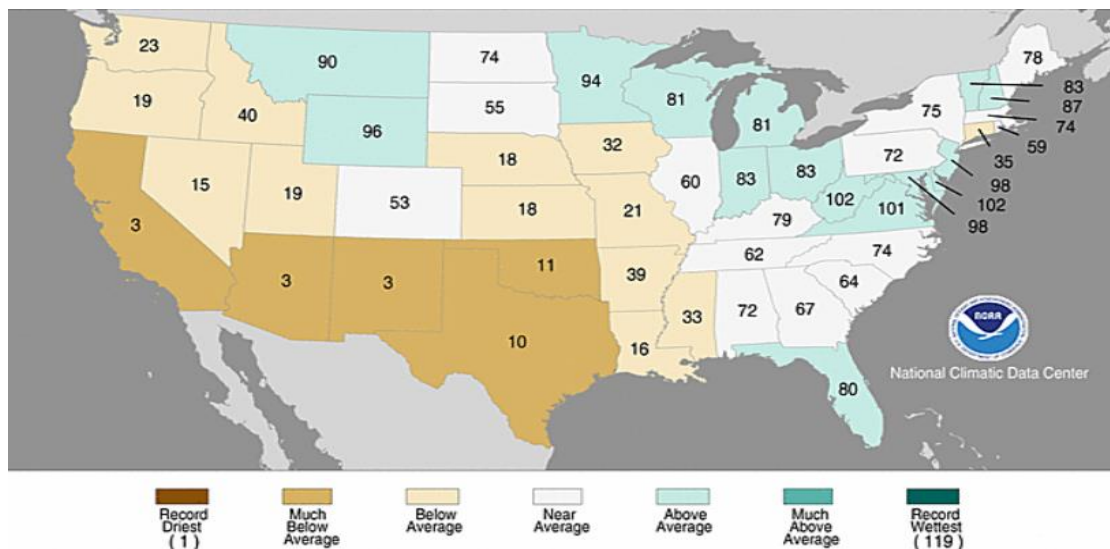
Σχημά 3.1: Απόκλίσεις θερμοκρασιών στην Βόρεια Αμερική για τον χειμώνα 2013-2014.

Πηγή: NASA Earth Observatory, <https://earthobservatory.nasa.gov/>

Συνολικά συμπεριλαμβάνοντας όλες τις Ηνωμένες Πολιτείες ήταν ο 34^{ος} πιο ψυχρός χειμώνας των τελευταίων 119 ετών (NCDC). Όμως, περιοχικά υπήρξαν αρκετά ρεκόρ τόσο αρνητικών απόκλίσεων όσο και θετικών, θερμοκρασιών και υετού αντίστοιχα (Εικόνες 3.2,3.3).



Σχήμα 3.2: Θερμοκρασιακή κατάταξη του χειμώνα 2013-2014 ανάμεσα στους τελευταίους 119 χειμώνες ανα πολιτεία. [National Climatic Data Center \(NCDC\)](http://www.ncdc.noaa.gov).

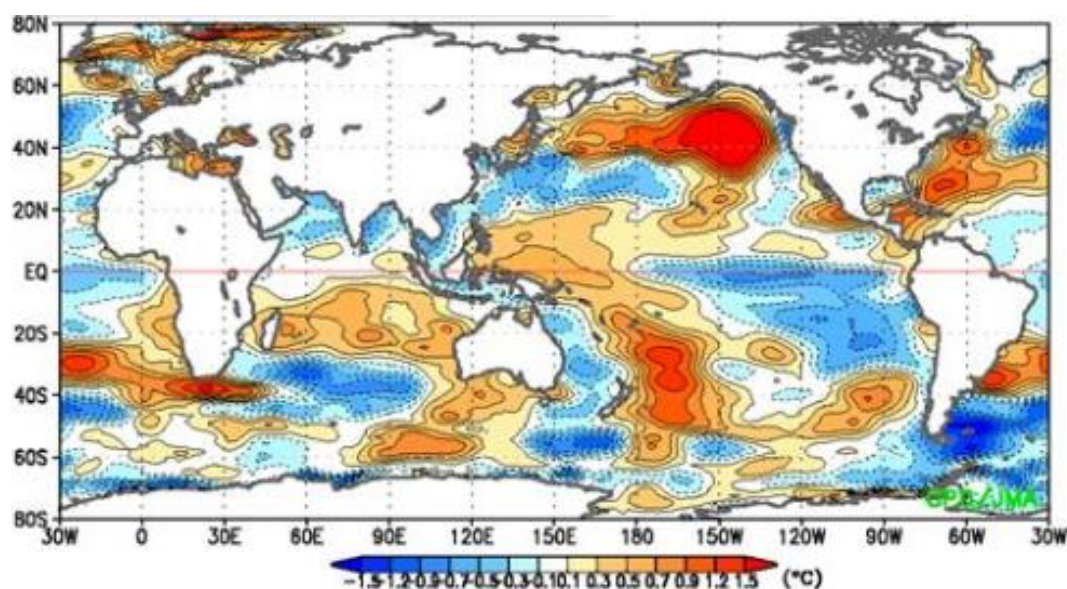


Σχήμα 3.3: Κατάταξη του χειμώνα 2013-2014 ανάμεσα στους τελευταίους 119 χειμώνες ανάλογα με το ποσό βροχόπτωσης σε κάθε πολιτεία των ΗΠΑ. [National Climatic Data Center \(NCDC\)](http://www.ncdc.noaa.gov).

Έτσι τα κεντρικά και ανατολικά τμήματα βίωσαν περιόδους με έντονο ψύχος συνοδεία χιονοπτώσεων, ενώ τα δυτικά τμήματα υψηλές θερμοκρασίες και μεγάλες περιόδους ανομβρίας. Μερικά βασικά χαρακτηριστικά του χειμώνα 2013-2014 είναι τα εξής: Θερμοκρασίες χαμηλότερες του μέσου όρου κυριάρχησαν ανατολικά των Βραχώδων όρων με τις χαμηλότερες θερμοκρασίες να παρατηρούνται στα κεντρικά τμήματα. Οι περισσότερες

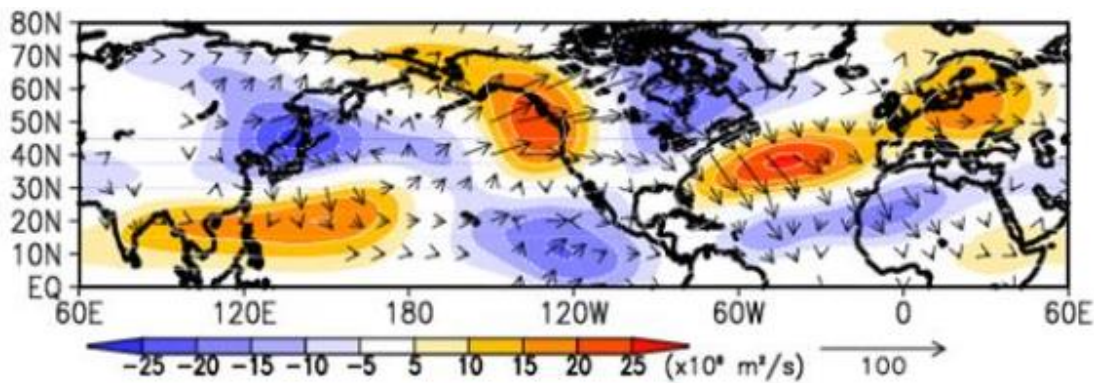
ψυχρές εισβολές παρατηρήθηκαν την περίοδο του Ιανουαρίου και του Φεβρουαρίου. Επτά πολιτείες των Ηνωμένων Πολιτειών έζησαν χειμώνες, που καταγράφονται μέσα στους 10 πιο κρύους τα τελευταία 120 έτη. Υψηλές θερμοκρασιακές αποκλίσεις παρατηρήθηκαν στη Φλόριντα, την Καλιφόρνια και την Αριζόνα. Η Καλιφόρνια έζησε τον πιο θερμό χειμώνα των τελευταίων 120 ετών. Θετικές αποκλίσεις νετού παρατηρήθηκαν στα Βραχώδη όρη, σε μέρη των κεντρικής Αμερικής καθώς και στα ανατολικά και βορειοανατολικά τμήματα της. Για τις πόλεις Νέα Υόρκη, Φιλαδέλφια, Σικάγο και Βοστώνη ο χειμώνας ήταν ένας από τους δέκα με τις εντονότερες χιονοπτώσεις τα τελευταία 120 έτη. Τέλος για την Αλάσκα ο χειμώνας ήταν ο όγδοος πιο θερμός τα τελευταία 120 χρόνια.

Σύμφωνα με μελέτες (Ryan 2014) για την κυκλοφορία που επικράτησε τον χειμώνα 2013-2014 και οδήγησε σε αυτά τα χαρακτηριστικά του χειμώνα στην Βόρεια Αμερική αναφέρονται τα εξής: Οι θερμοκρασίες θάλασσας για το χειμώνα 2013-2014 παρουσίασαν αρνητικές αποκλίσεις στο ισημερινό τμήμα του κεντρικού και ανατολικού Ειρηνικού. Αυτές συνδυάστηκαν με θερμές αποκλίσεις στο Βόρειο τμήμα του Ειρηνικού Ωκεανού (Σχήμα 3.4).



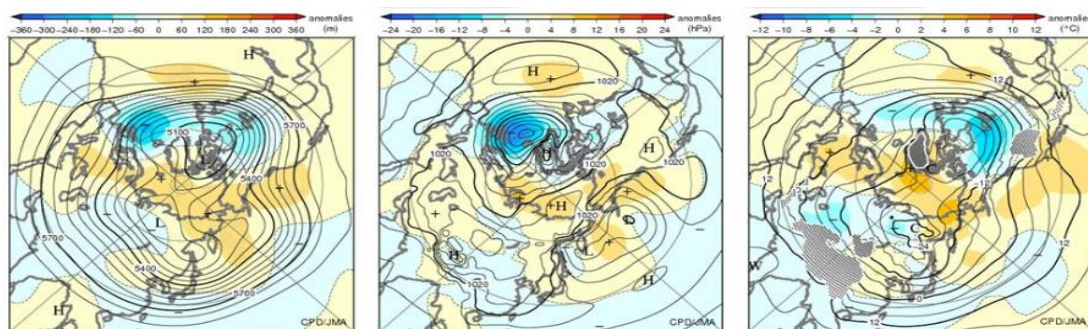
Σχήμα 3.4: Αποκλίσεις θερμοκρασιών Θάλασσας από την κλιματική τιμή για το χειμώνα 2013-2014. [National Climatic Data Center \(NCDC\)](https://www.ncdc.noaa.gov).

Σχεδόν στάσιμα κύματα Rossby παρατηρήθηκαν στη μέση και ανώτερη τροπόσφαιρα κατά μήκος του Βορειοδυτικού Ειρηνικού έως τη Βόρεια Αμερική με αντικυκλωνική κυκλοφορία (ridge) πάνω από τη Δυτική και Βορειοδυτική Αμερική και κυκλωνική κυκλοφορία (troughs) στα κεντρικά και ανατολικά τμήματα της Βορείου Αμερικής (reference) (Σχήμα 3.5).



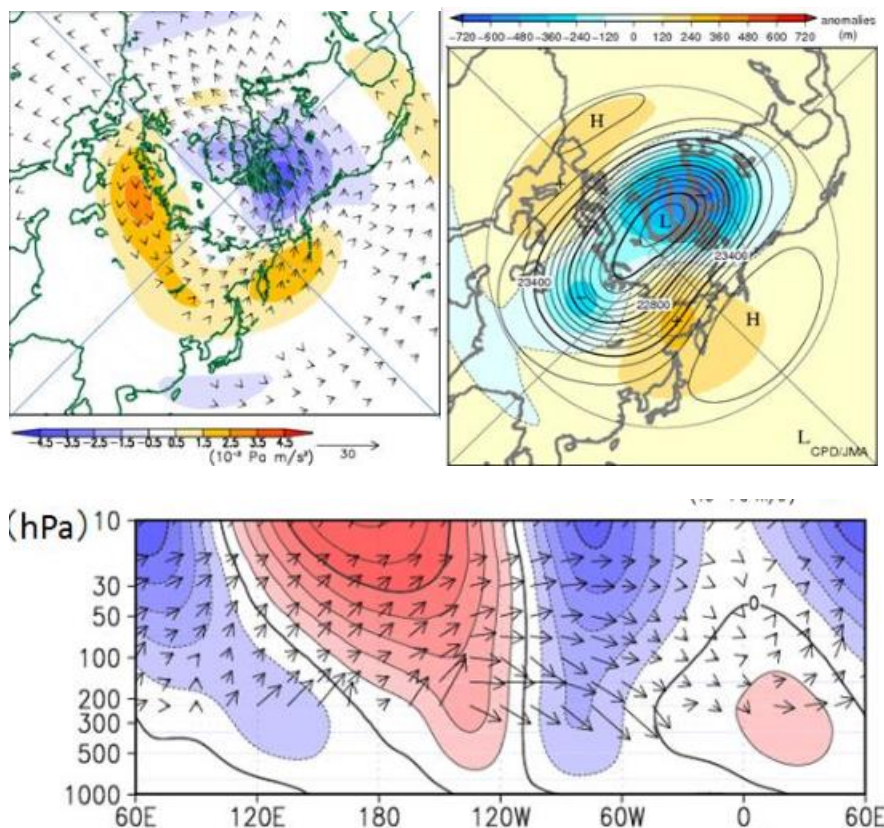
Σχήμα 3.5: Οι σκιασμένες περιοχές αναφέρονται στις ανωμαλίες της 'συνάρτησης ρευματογραμμών' (streamfunction) ψ από τη μέση ζωνική τιμή στα 300hPa για τον χειμώνα 2013-2014, ενώ τα διανύσματα απεικονίζουν τη μέση ροή και διεύθυνση των κυμάτων στα 300hPa. Πηγή: Cohen et al. (2014)

Στο πεδίο της πίεσης, στη μέση στάθμη της θάλασσας θετικές και αρνητικές ανωμαλίες παρουσιάζονται στη δυτική και ανατολική Βόρεια Αμερική αντίστοιχα και ψυχρές πολικές αέριες μάζες κινούνται από τον Καναδά προς την Κεντρική και Ανατολική Βόρεια Αμερική (Σχήμα 3.6).

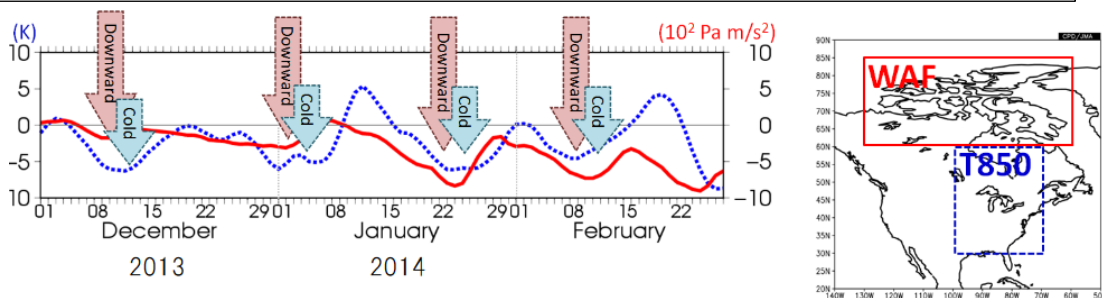


Σχήμα 3.6: Στην πρώτη εικόνα παρουσιάζονται οι ανωμαλίες των γεωδυναμικών στα 500hPa για το χειμώνα 2013-2014. Στη δεύτερη και Τρίτη εικόνα παρουσιάζονται οι ανωμαλίες πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας και θερμοκρασίας στα 850hPa. Πηγή: Cohen et. Al. (2014)

Στην στάθμη των 30hPa φαίνεται πολύ ενισχυμένος ο αντικυκλώνας των Αλεούτιων νήσων ο οποίος έχει επεκταθεί προς τις πολικές περιοχές με αποτέλεσμα ο πολικός στρόβιλος να έχει μετατοπιστεί προς τον Καναδά. Αυτή η μετατόπιση του πολικού στροβίλου προς την Βόρεια Αμερική είχε ως αποτέλεσμα τη συνεχή τροφοδοσία ψύχους προς τις νοτιότερες περιοχές της Αμερικής. Ανοδική κίνηση πλανητικών κυμάτων παρατηρήθηκε από την τροπόσφαιρα προς τη στρατόσφαιρα στην περιοχή της Σιβηρίας και καθοδικές κινήσεις στην περιοχή του Καναδά οι οποίες ενδέχεται να συνέβαλαν στην ενίσχυση του αυλώνα στις κεντρικές και ανατολικές περιοχές της Βόρειας Αμερικής (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7: Στην πρώτη εικόνα πάνω αριστερά παρουσιάζεται η ροή των πλανητικών κυμάτων στα 100hPa. Οι σκιασμένες περιοχές αντιστοιχούν στις κατακόρυφες κινήσεις ενώ τα διανύσματα στις οριζόντιες. Στο δεύτερο σχήμα φαίνεται η ανωμαλία γεωδυναμικών στα 30hPa. Το 3^ο σχήμα είναι ένα cross section μεσοποιημένο από το 40-80 βόρειο και δείχνει με σκίαση τις απόκλίσεις γεωδυναμικών υψών, ενώ τα διανύσματα την κατακόρυφη διάδοση των πλανητικών κυμάτων. Πηγή: Cohen et. Al. (2014)

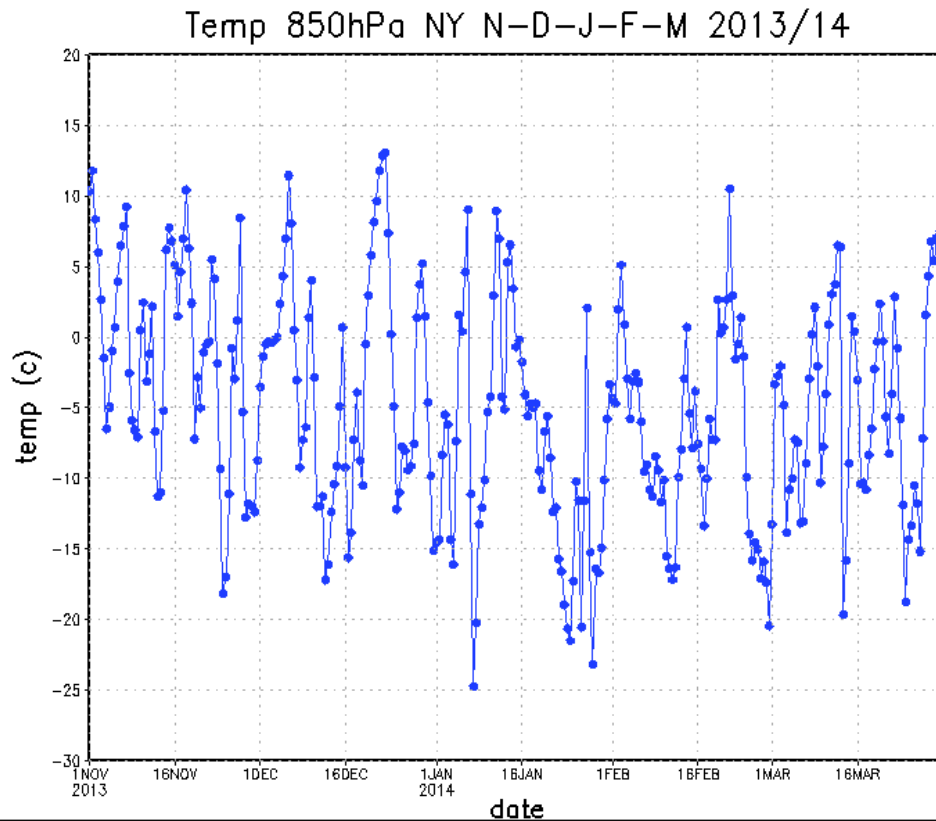


Σχήμα 3.8: Συσχέτιση μεταξύ της κατακόρυφης μεταφοράς των πλανητικών κυμάτων στην περιοχή του Καναδά και των θερμοκρασιών στα κεντρικά και ανατολικά τμήματα των Ηνωμένων Πολιτειών. Πηγή: Cohen et. Al. (2014)

3.3 Επιλογή της περιόδου ενδιαφέροντος

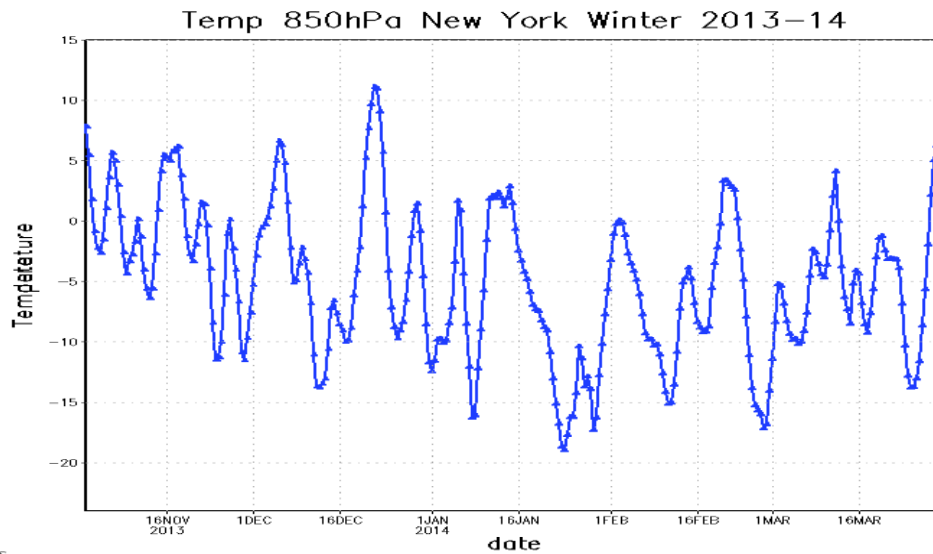
Στόχος για την μεσοπρόθεσμη πρόγνωση ήταν αρχικά να βρεθεί μια περίοδος ενδιαφέροντος η οποία θα παρουσιάζει ισχυρά σήματα συνοπτικής κλίμακας. Αφού καταλήξαμε στην περίοδο του χειμώνα 2013-2014, στη συνέχεια ο σκοπός ήταν να απομονωθεί ένα συγκεκριμένο γεγονός. Αρχικά δημιουργήθηκαν χρονοσειρές της θερμοκρασίας στα 850hPa στην περιοχή της Ανατολικής Βορείου Αμερικής. Τρία

χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η θερμοκρασία στα 850hPa στις περιοχές της Νέας Υόρκης, Βοστώνης και Ουάσινγκτον (Σχήμα 3.10-3.12).



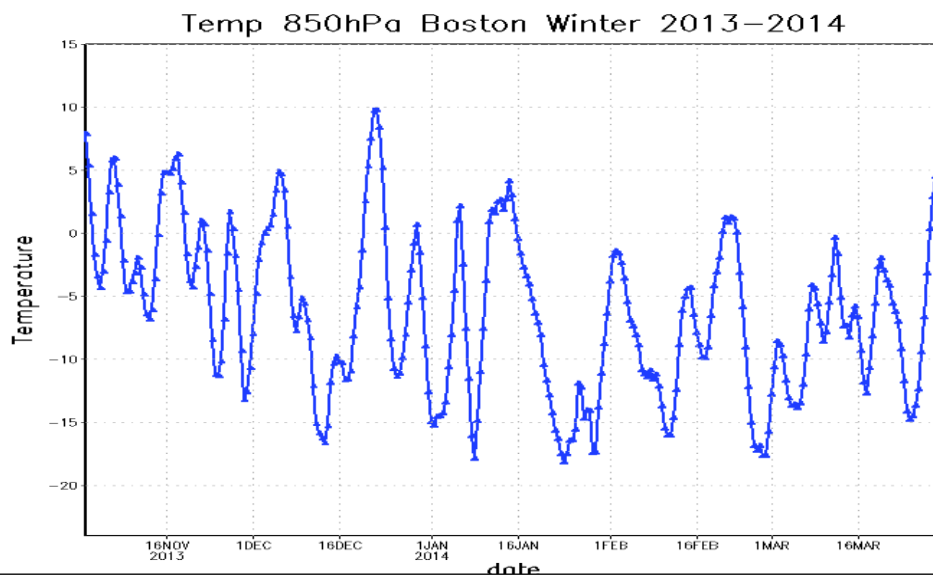
Σχήμα 3.9: Χρονοσειρά θερμοκρασίας στα 850hPa στην περιοχή της Νέας Υόρκης για τον χειμώνα 2013-2014. Το σχήμα έχει παραχθεί με δεδομένα αναλύσεων του ECMWF απο το πιο κοντινό πλεγματικό σημείο στην περιοχή της Νέας Υόρκης

Από τη χρονοσειρά της θερμοκρασίας στα 850hPa στην Νέα Υόρκη για το χειμώνα 2013-2014 παρατηρείται ότι οι τρεις εντονότερες θερμοκρασιακά ψυχρές εισβολές έλαβαν χώρα στις 7 Ιανουαρίου, στις 25-29 Ιανουαρίου και στα τέλη Ιανουαρίου. Για την επιλογή της ψυχρής εισβολής αναφοράς δημιουργήθηκαν για την περιοχή Νέας Υόρκης, Βοστώνης και Ουάσινγκτον χρονοσειρές θερμοκρασίας στα 850hPa, όπου κάθε σημείο στα διαγράμματα είναι ο μέσος όρος των τιμών θερμοκρασίας στην περιοχή εκείνη την χρονική στιγμή καθώς και τις δύο προηγούμενες και δύο επόμενες. (running average).

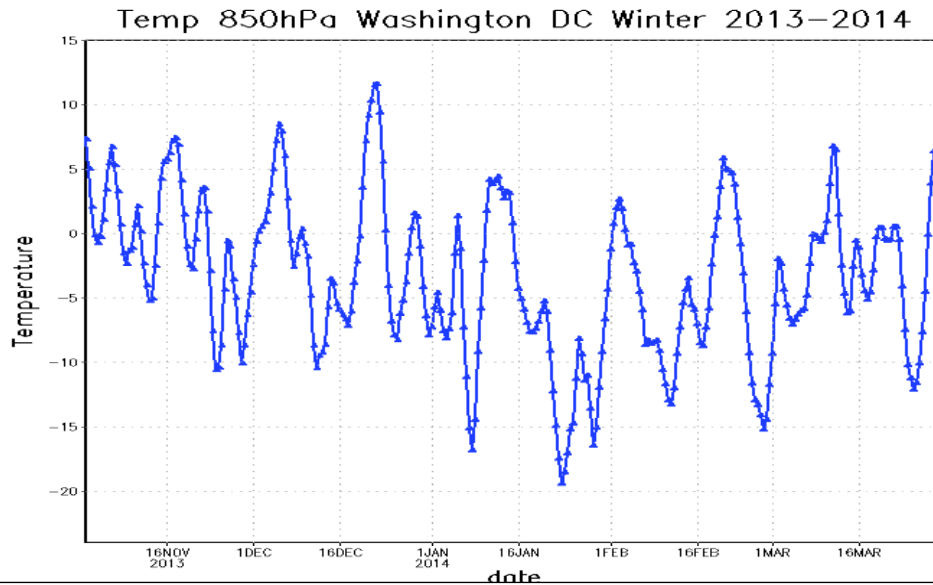


GrADS: CDLA/IGES

Σχήμα 3.10: Χρονοσειρά θερμοκρασίας στα 850hPa για την περιοχή της Νέας Υόρκης για τον μήνα Ιανουάριο τον χειμώνα 2013-2014. Κάθε σημείο της χρονοσειράς αναπαριστά τον μέσο όρο της χρονικής στιγμής στην οποία αναφέρεται καθώς και των δύο προηγούμενων και δύο επόμενων. Το σχήμα έχει παραχθεί με δεδομένα αναλύσεων του ECMWF απο το πιο κοντινό πλεγματικό σημείο στην περιοχή της Νέας Υόρκης



Σχήμα 3.11: Ομοίως με το Σχήμα 3.10 αλλά για την περιοχή της Βοστώνης.



Σχήμα 3.12: Ομοίως με τα σχήματα 3.10 και 3.11 αλλά για την περιοχή της Ουάσινγκτον.

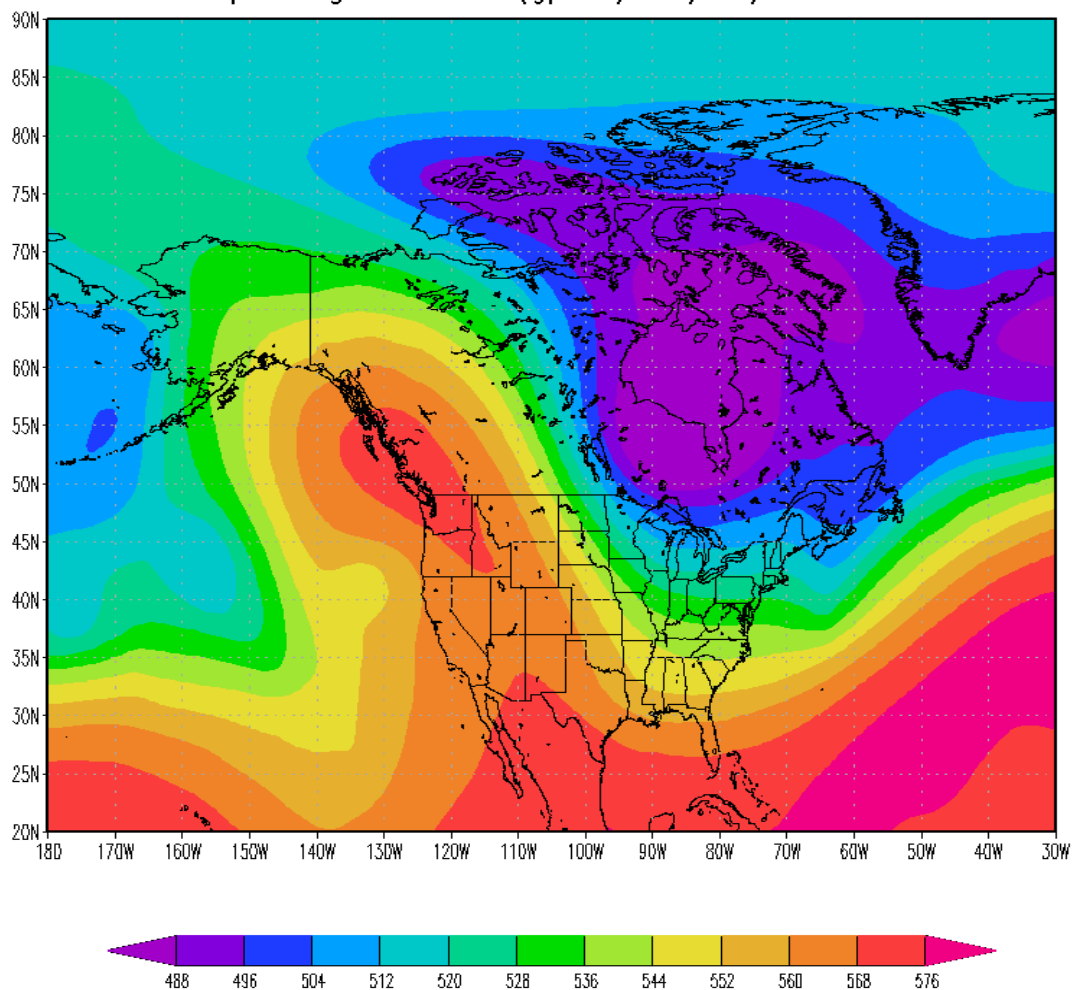
Από τους κινητούς μέσους των χρονοσειρών της θερμοκρασίας στα 850hPa προκύπτει ότι η εντονότερη ψυχρή εισβολή για το χειμώνα 2013-2014 παρουσιάστηκε το τελευταίο δεκαήμερο του Ιανουαρίου. Έτσι επιλέχθηκε η περίοδος 25 έως 29 Ιανουαρίου ως περίοδος αναφοράς και η μελέτη της μεσοπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης προγνωσιμότητας του μοντέλου WRF έγινε με βάση αυτή.

3.4 Συνοπτική ανάλυση της περιόδου ενδιαφέροντος

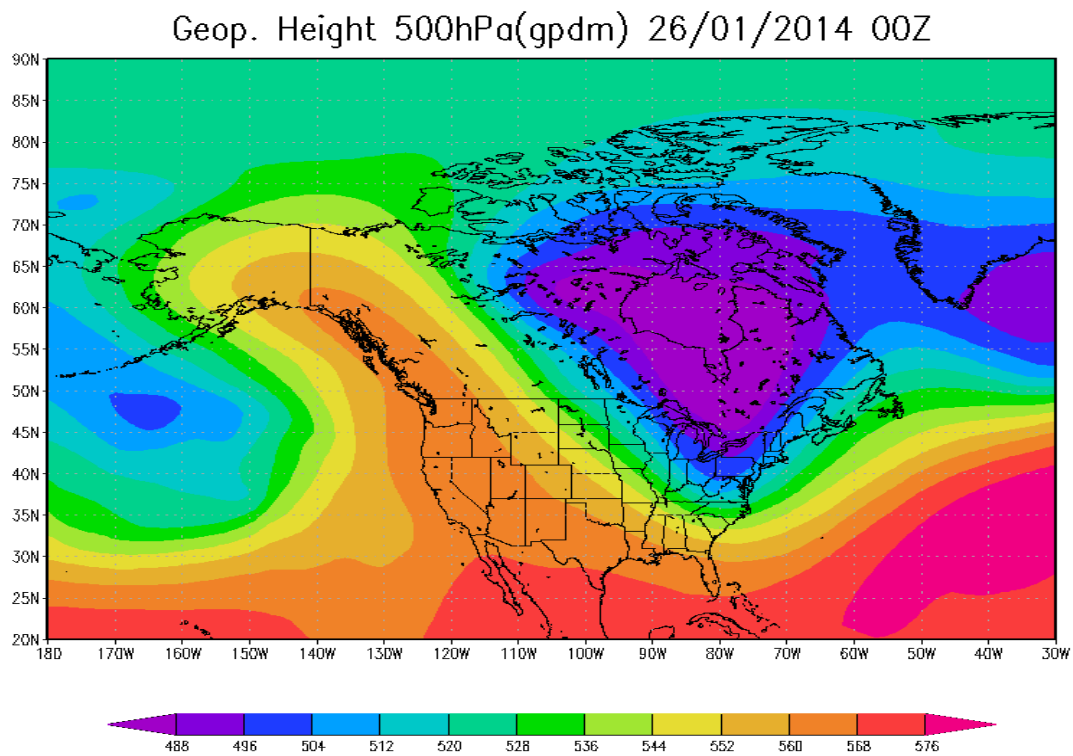
Σε αυτή την ενότητα θα πραγματοποιηθεί η παρουσίαση των χαρακτηριστικών της ψυχρής εισβολής στη Βόρεια Αμερική, την περίοδο 25-29 Ιανουαρίου του έτους 2014. Η γραφική απεικόνιση των βασικών πεδίων πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα απεικόνισης GRADS. Τα δεδομένα reanalysis που χρησιμοποιήθηκαν για την οπτική αναπαράσταση του γεγονότος είναι τα ERA-Interim του Ευρωπαϊκού Κέντρου ECMWF (European Centre for Medium-Range Forecasts). Έχουν χωρική ανάλυση 0.75 μοίρες ήτοι 80 χιλιόμετρα.

Αρχικά η περίοδος 25-29 Ιανουαρίου 2014 στη Βόρεια Αμερική χαρακτηρίστηκε από μια ράχη στην στάθμη των 500hPa στην περιοχή των δυτικών ακτών και με προέκταση μέχρι την περιοχή της Αλάσκας. Γενικευμένος αυλώνας στην Κεντρική και Ανατολική Βόρεια Αμερική εμφανίστηκε όπως φαίνεται στους χάρτες γεωδυναμικών υψών που ακολουθούν (Σχήματα 3.13-3.17). Τα υψηλά γεωδυναμικά ύψη στην περιοχή της Δυτικής Βόρειας Αμερικής τα οποία επεκτάθηκαν έως περιοχές της αρκτικής ανάγκασαν αέριες μάζες πολικής προέλευσης να κινηθούν νότια και να επεκταθούν έως και γεωγραφικά πλάτη κοντά στο 30 Βόρειο. Όπως φαίνεται και στα σχήματα 3.13-3.17 το μέρος του αυλώνα με τα μικρότερα γεωδυναμικά ύψη κάλυψε μεγάλο τμήμα της Κεντρικής και ανατολικής Βόρειας Αμερικής. Εκτός των ακραίων τιμών θερμοκρασίας που παρατηρήθηκαν τον μήνα Ιανουάριο στα παραπάνω τμήματα (<https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/mapping/201401>) η διάρκεια της ψυχρής εισβολής ήταν της τάξεως των 10 ημερών όπως φαίνεται και στα σχήματα (3.10-3.12).

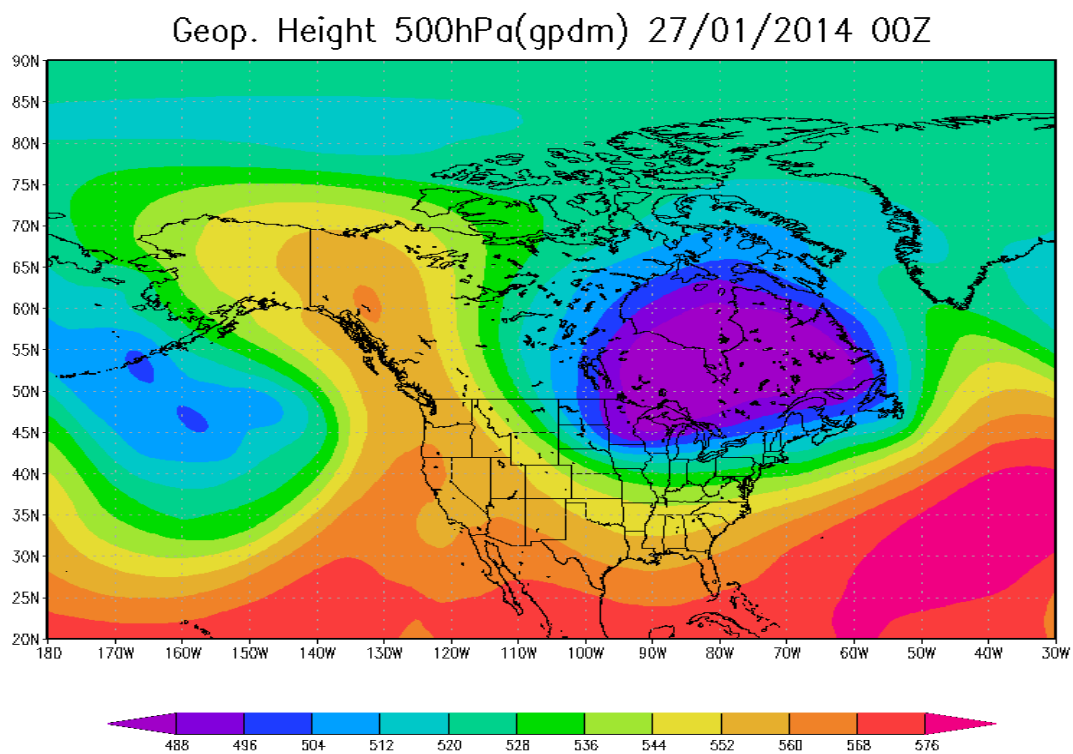
Geop. Height 500hPa(gpdm) 25/01/2014 00Z



Σχήμα 3.13: Χάρτης γεωδυναμικού ύψους (gpdm) στα 500hPa στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής 25/01/2014, 00Z.

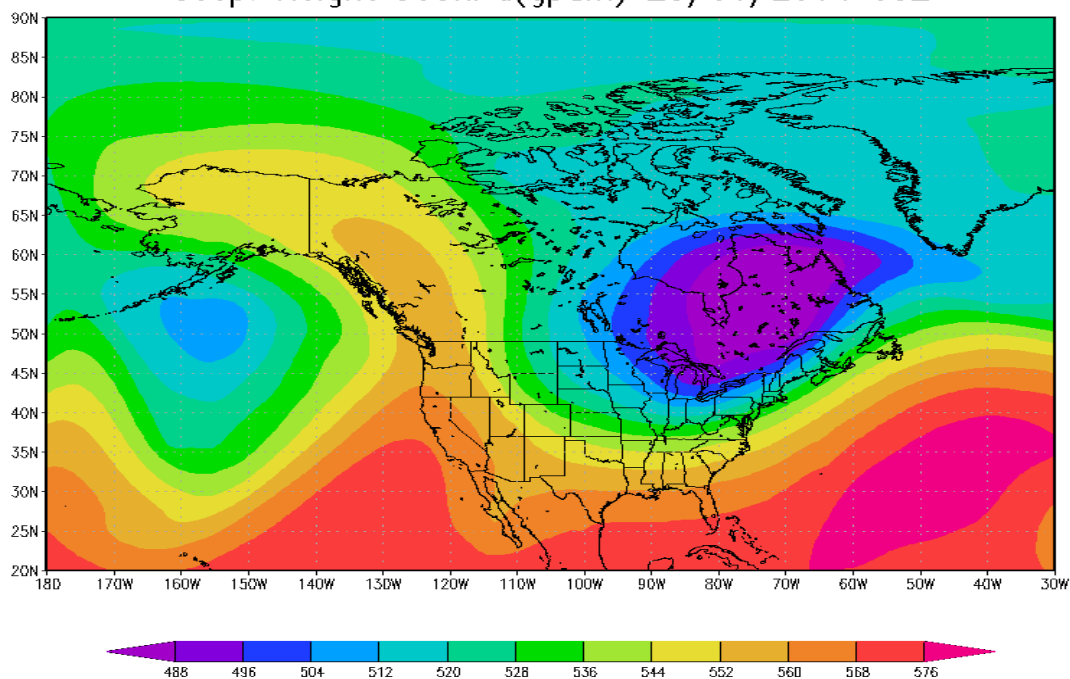


Σχήμα 3.14: Χάρτης γεωδυναμικού ύψους (gpdm) στα 500hPa στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής 26/01/2014, 00Z.



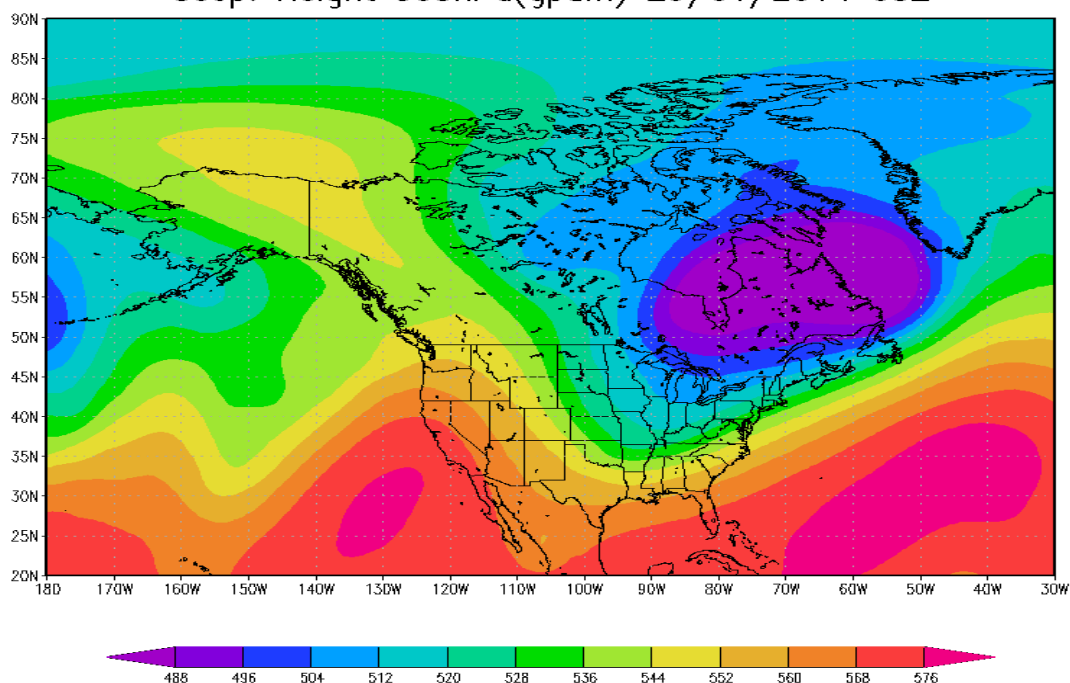
Σχήμα 3.15: Χάρτης γεωδυναμικού ύψους (gpdm) στα 500hPa στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής 27/01/2014, 00Z.

Geop. Height 500hPa(gpdm) 28/01/2014 00Z



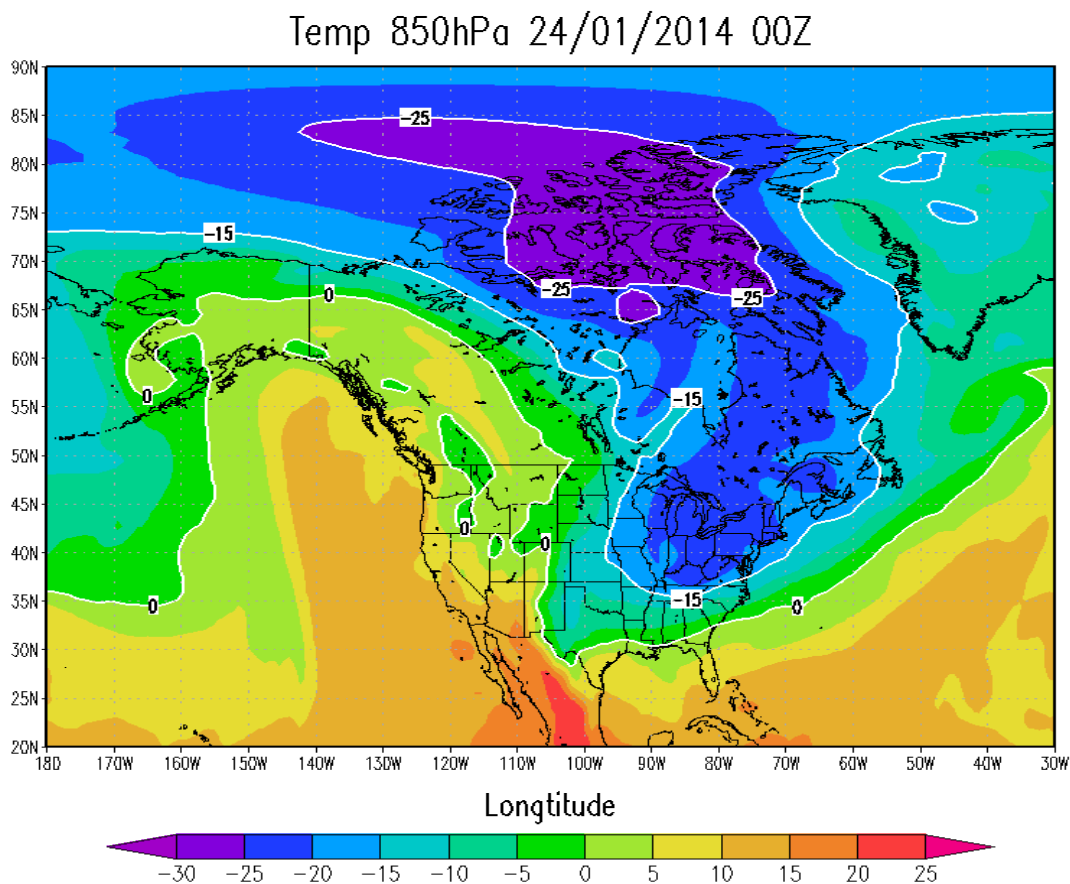
Σχήμα 3.16: Χάρτης γεωδυναμικού ύψους (gpdm) στα 500hPa στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής 28/01/2014, 00Z.

Geop. Height 500hPa(gpdm) 29/01/2014 00Z

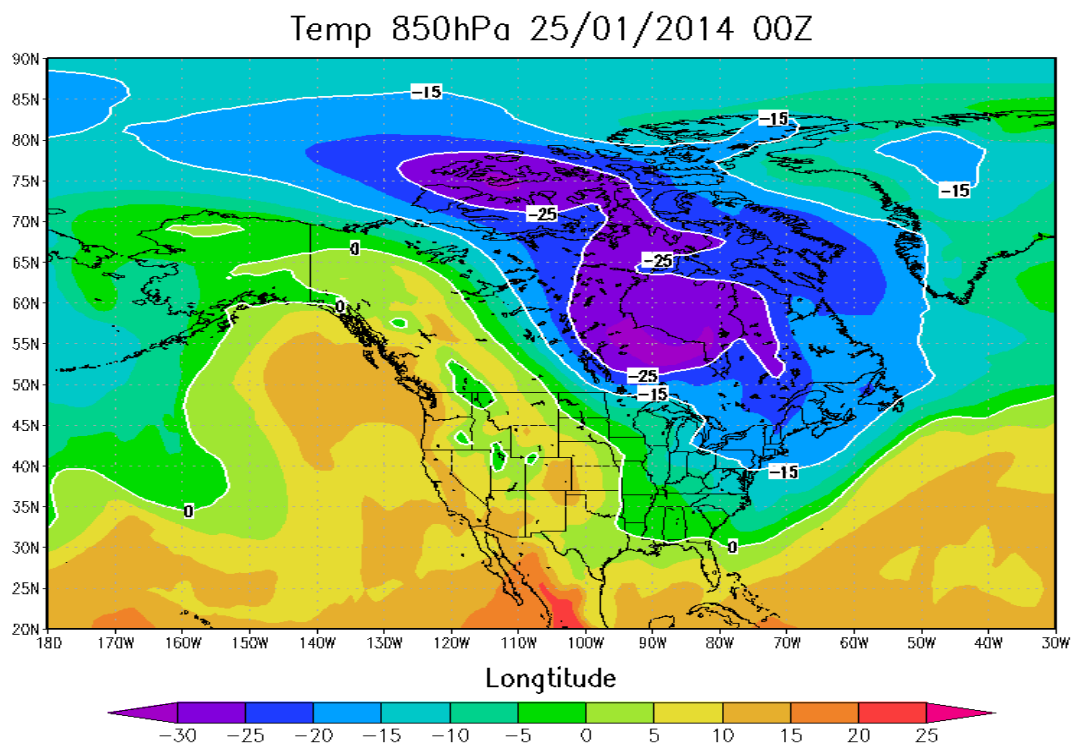


Σχήμα 3.17: Χάρτης γεωδυναμικού ύψους (gpdm) στα 500hPa στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής 28/01/2014, 00Z.

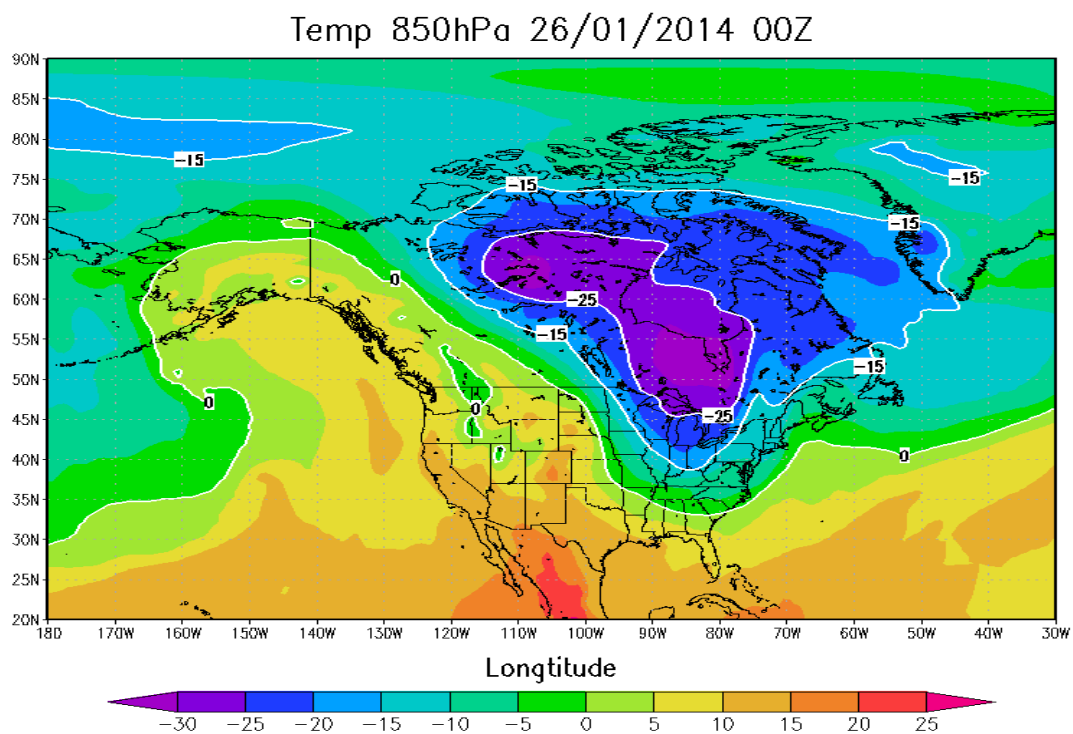
Τα υψηλά γεωδυναμικά ύψη στη Δυτική πλευρά της Βορείου Αμερικής συνδυάστηκαν με υψηλές θερμοκρασίες στη στάθμη των 850hPa, ενώ αντίστοιχα στην περιοχή των ανατολικών ακτών παρατηρήθηκαν πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και έντονο ψύχος, όπως φαίνεται και στα σχήματα 3.18-3.23. Αρνητικές θερμοκρασίες στην στάθμη των 850hPa παρατηρήθηκαν έως και την πολιτεία της Φλόριντα και το μεξικό ενώ σε πολλές πολιτείες των ανατολικών και κεντρικών τμημάτων της Βόρειας Αμερικής παρατηρήθηκαν θερμοκρασιακές αποκλίσεις της τάξεως των 20 βαθμών κάτω από τις κλιματικές τιμές (<https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/national/201401>). Θερμοκρασίες έως -30 στην στάθμη των 850hPa παρατηρήθηκαν στην πολιτεία της Νέας Υόρκης όπως φαίνεται στα σχήματα 3.18-3.23. Πράγματι υψηλών θερμοκρασιών είχαμε στην Αλάσκα όπου θερμοκρασίες έως και 18 βαθμούς πάνω από τις κλιματικές τιμές παρατηρήθηκαν σε διάφορα τμήματα της χώρας (<https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/national/201401>).



Σχήμα 3.18: Χάρτης θερμοκρασίας (°C) στη στάθμη των 850hPa στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής 24/01/2014, 00Z

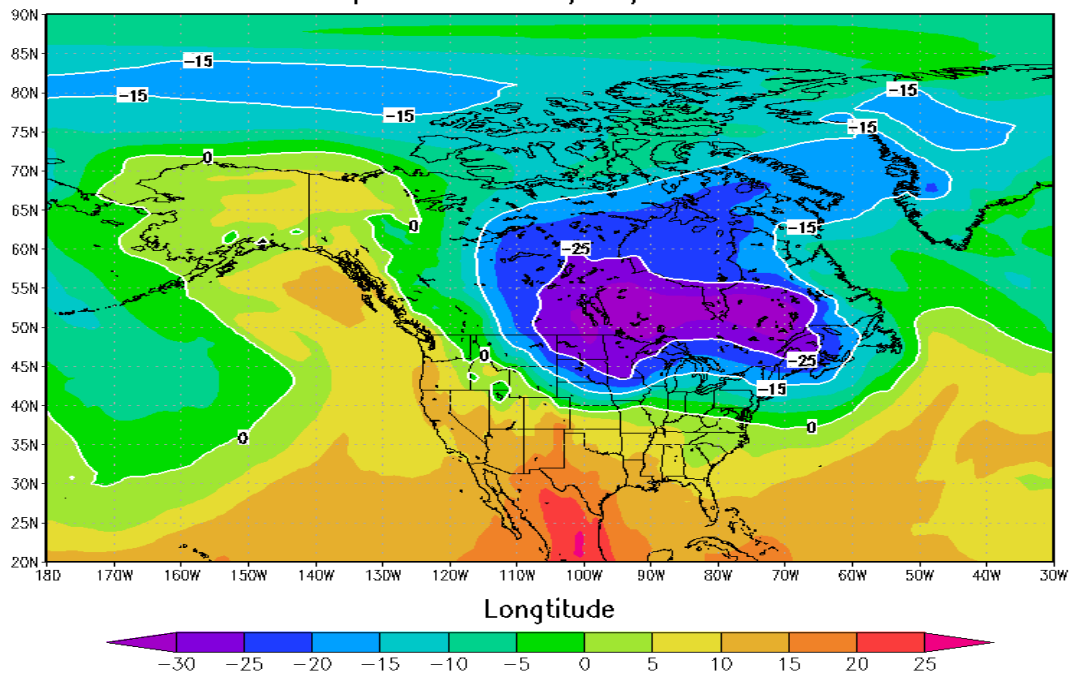


Σχήμα 3.19: Χάρτης θερμοκρασίας (°C) στη στάθμη των 850hPa στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής 25/01/2014, 00Z



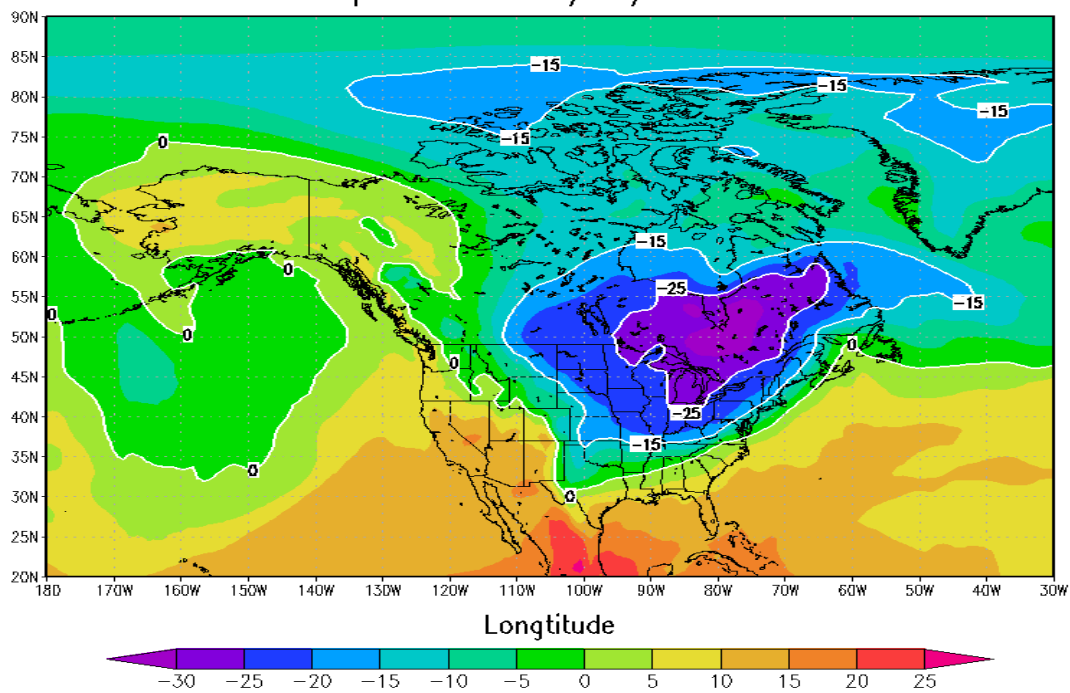
Σχήμα 3.20: Χάρτης θερμοκρασίας (°C) στη στάθμη των 850hPa στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής 26/01/2014, 00Z

Temp 850hPa 27/01/2014 00Z



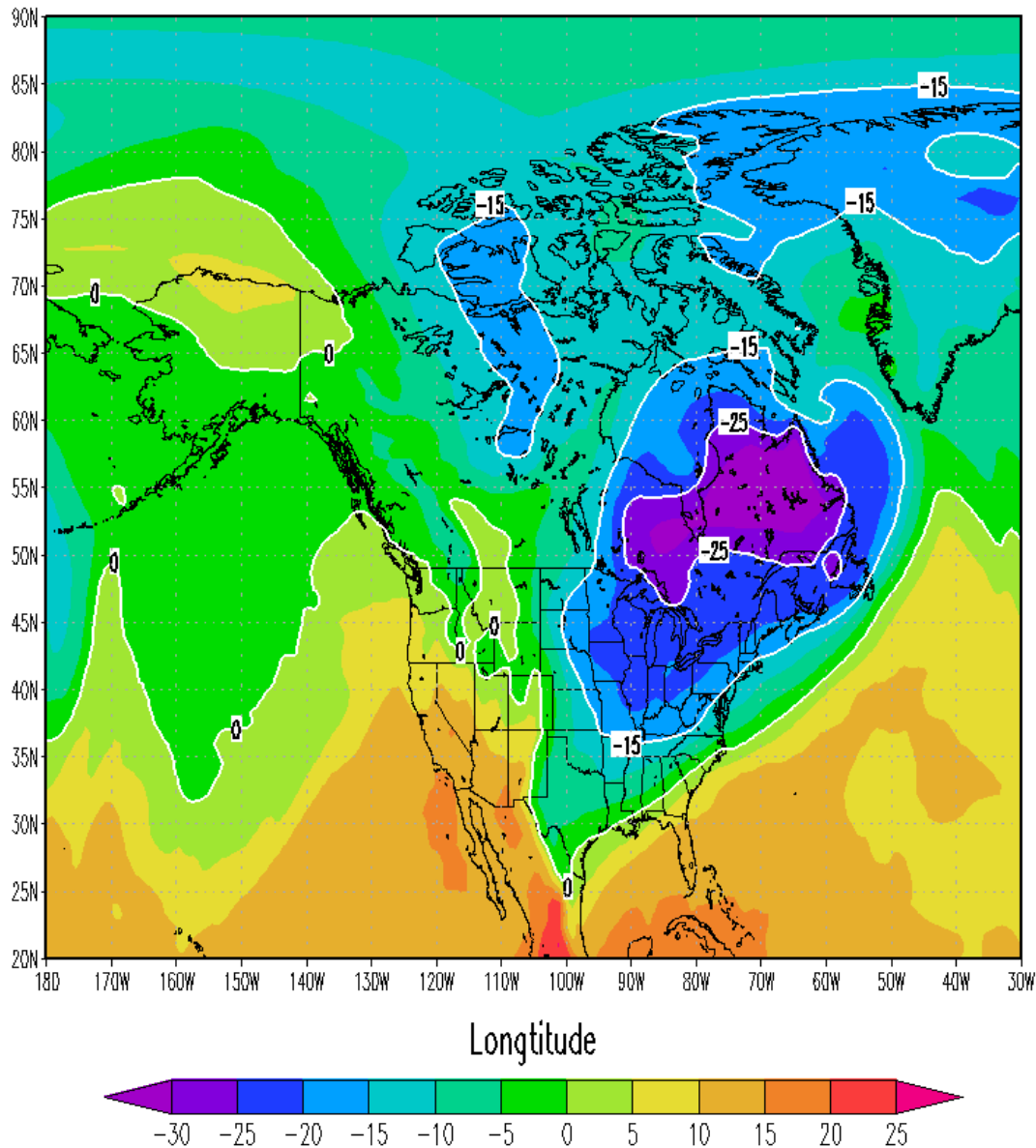
Σχήμα 3.21: Χάρτης θερμοκρασίας (°C) στη στάθμη των 850hPa στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής 27/01/2014, 00Z

Temp 850hPa 28/01/2014 00Z



Σχήμα 3.22: Χάρτης θερμοκρασίας (°C) στη στάθμη των 850hPa στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής 28/01/2014, 00Z

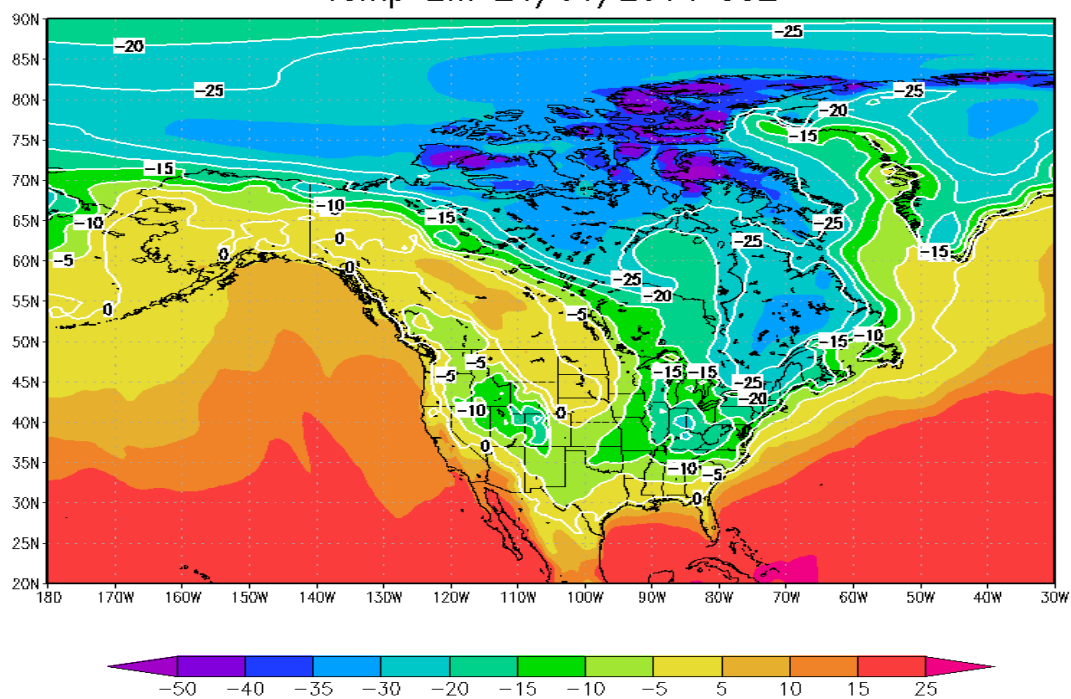
Temp 850hPa 29/01/2014 00Z



Σχήμα 3.23: Χάρτης θερμοκρασίας (°C) στη στάθμη των 850hPa στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής 29/01/2014, 00Z

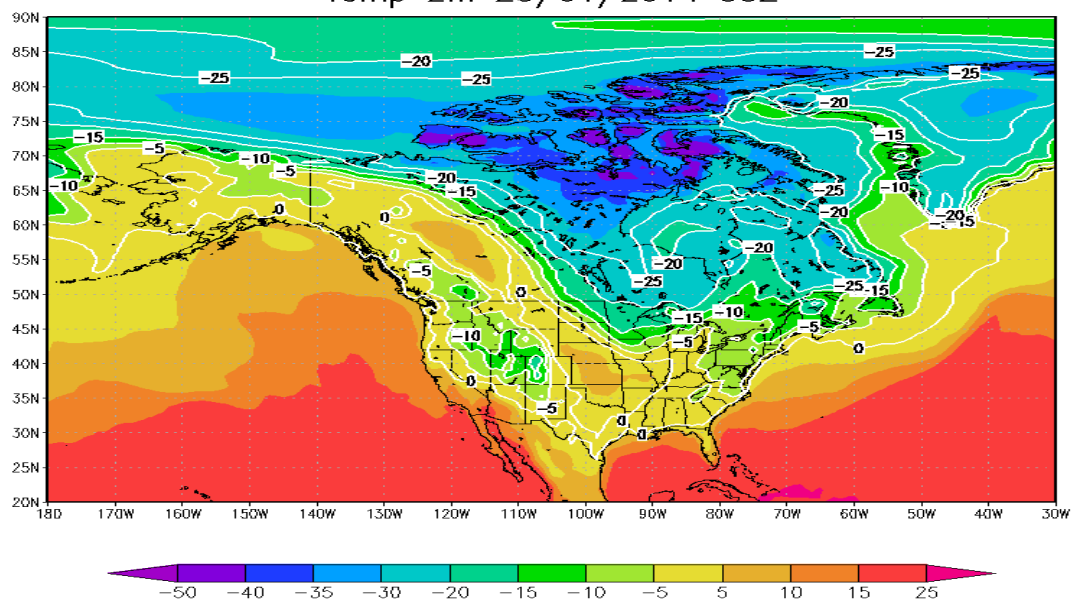
Οι θερμοκρασίες επιφανείας παρουσιάζουν παρόμοια πορεία με τις θερμοκρασίες στα 850 hPa, όπως φαίνεται στα σχήματα 3.24-3.29. Αρνητικές θερμοκρασίες επιφανείας είχαμε σε όλα σχεδόν τα τμήματα της κεντρικής και ανατολικής Βόρειας Αμερικής ενώ θετικές θερμοκρασίες επιφανείας είχαν τα περισσότερα τμήματα των Δυτικών ακτών της Βόρειας Αμερικής. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες παρατηρήθηκαν στις πολιτείες της Νέας Υόρκης, Πενσυλβάνια, Μασαχουσέτη, Οχάιο και Μίτσιγκαν (<https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/national/201401>) όπως φαίνεται και στα σχήματα 3.24-3.29.

Temp 2m 24/01/2014 00Z



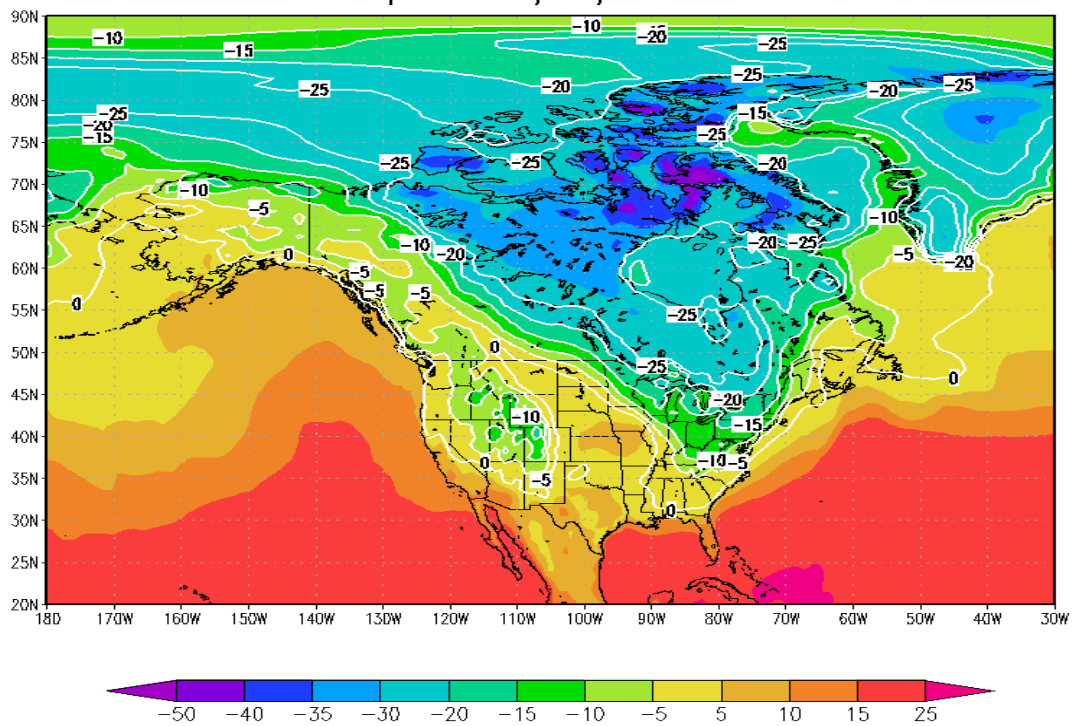
Σχήμα 3.24: Θερμοκρασία 2μ(°C) στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής 24/01/2014, 00Z

Temp 2m 25/01/2014 00Z



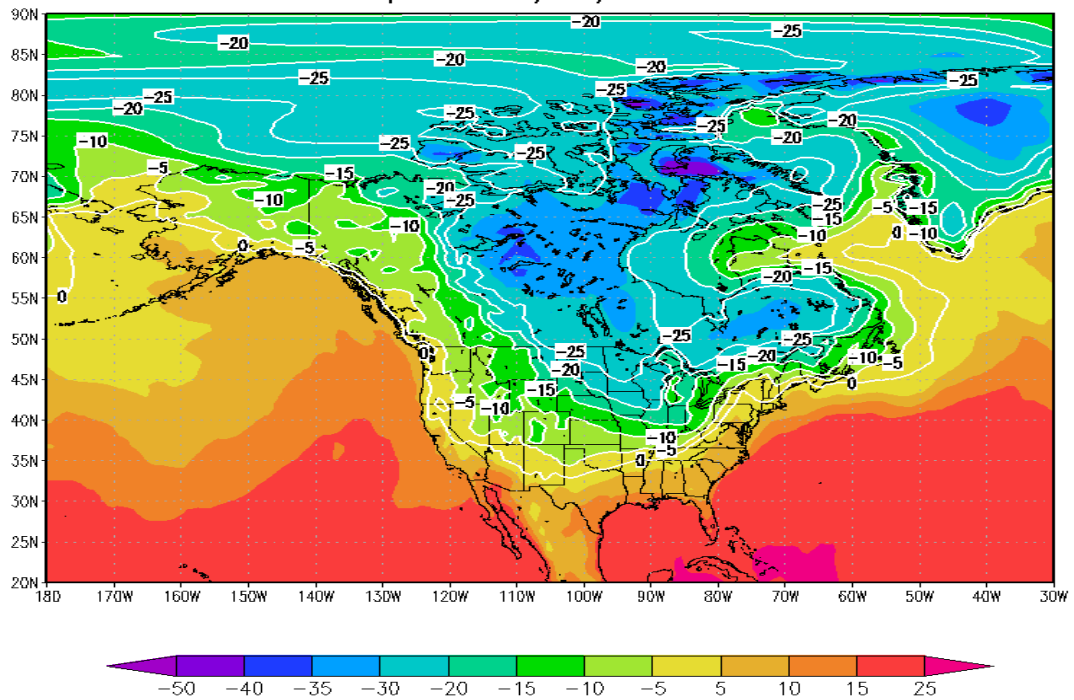
Σχήμα 3.25: Θερμοκρασία 2μ επιφανείας (°C) στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής 25/01/2014, 00Z

Temp 2m 26/01/2014 00Z



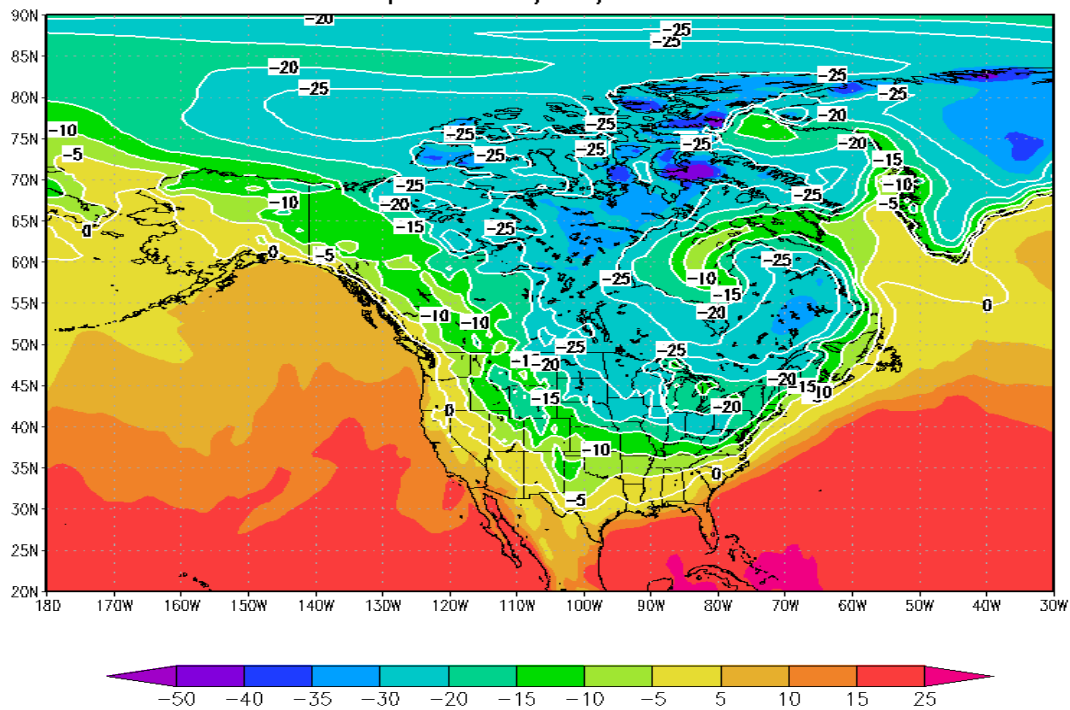
Σχήμα 3.26: Θερμοκρασία 2μ επιφανείας (°C) στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής 26/01/2014, 00Z

Temp 2m 27/01/2014 00Z



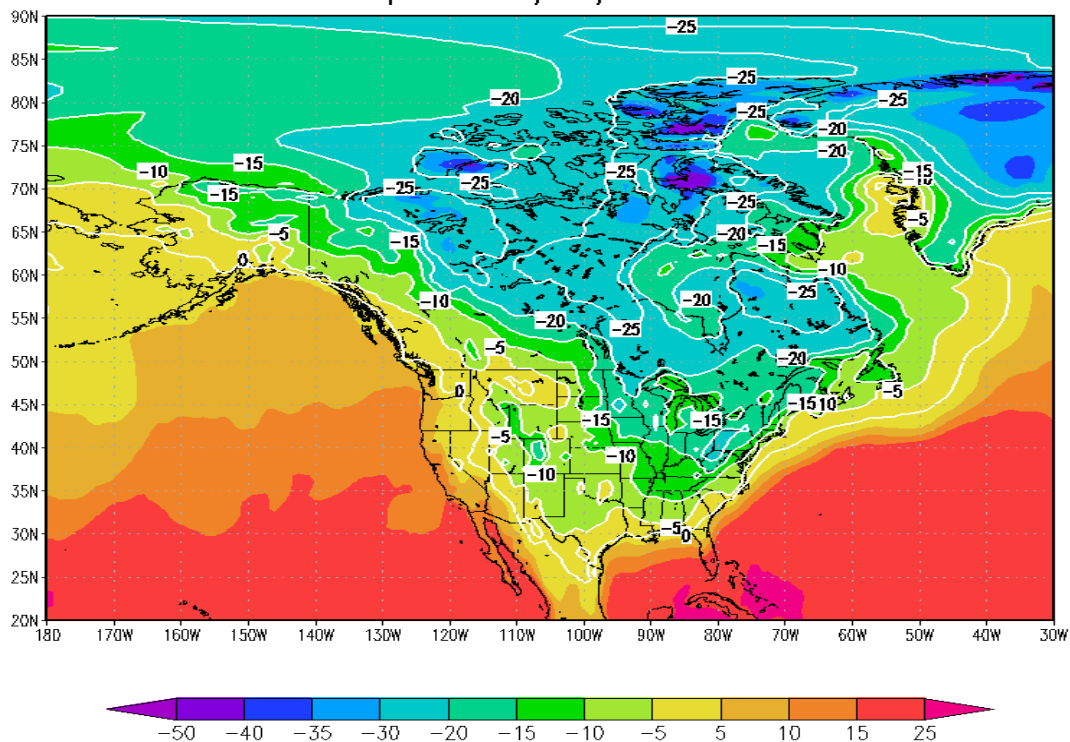
Σχήμα 3.27: Θερμοκρασία 2μ επιφανείας (°C) στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής 27/01/2014, 00Z

Temp 2m 28/01/2014 00Z



Σχήμα 3.28: Θερμοκρασία 2μ επιφανείας (°C) στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής 28/01/2014, 00Z

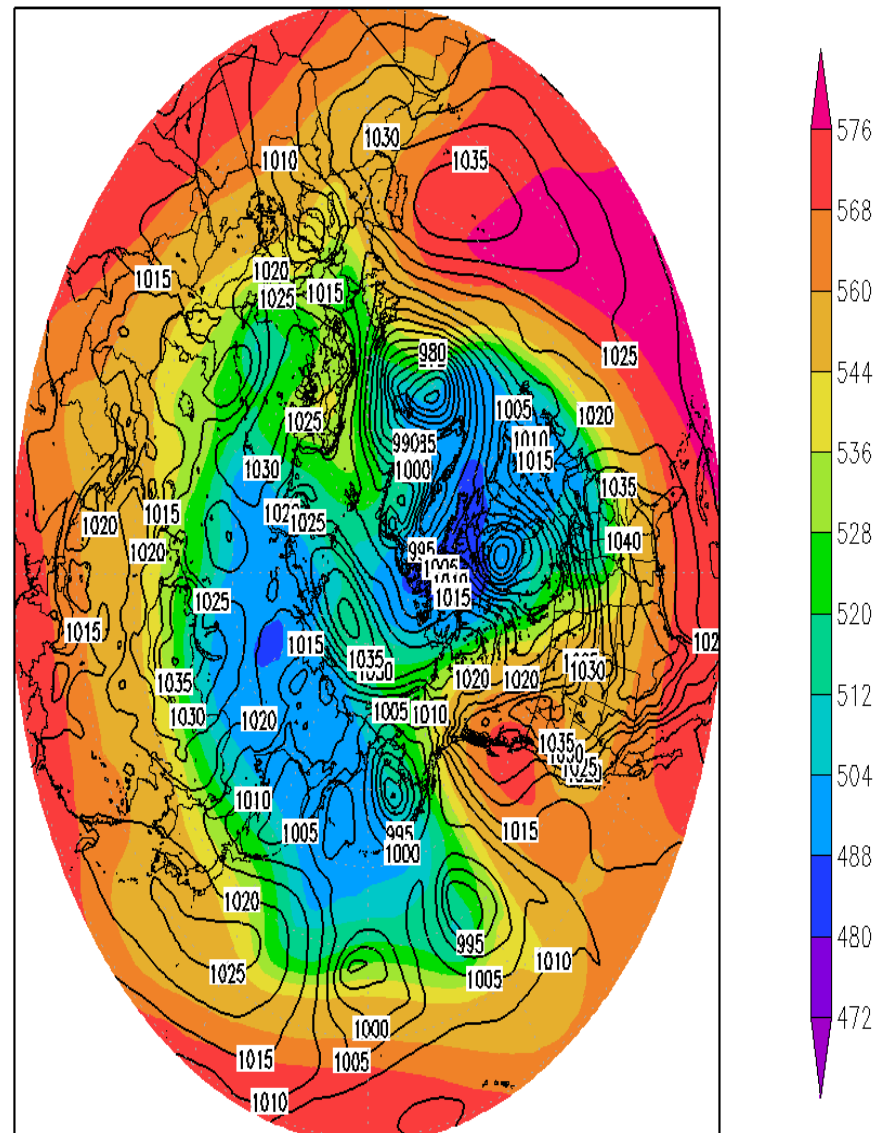
Temp 2m 29/01/2014 00Z



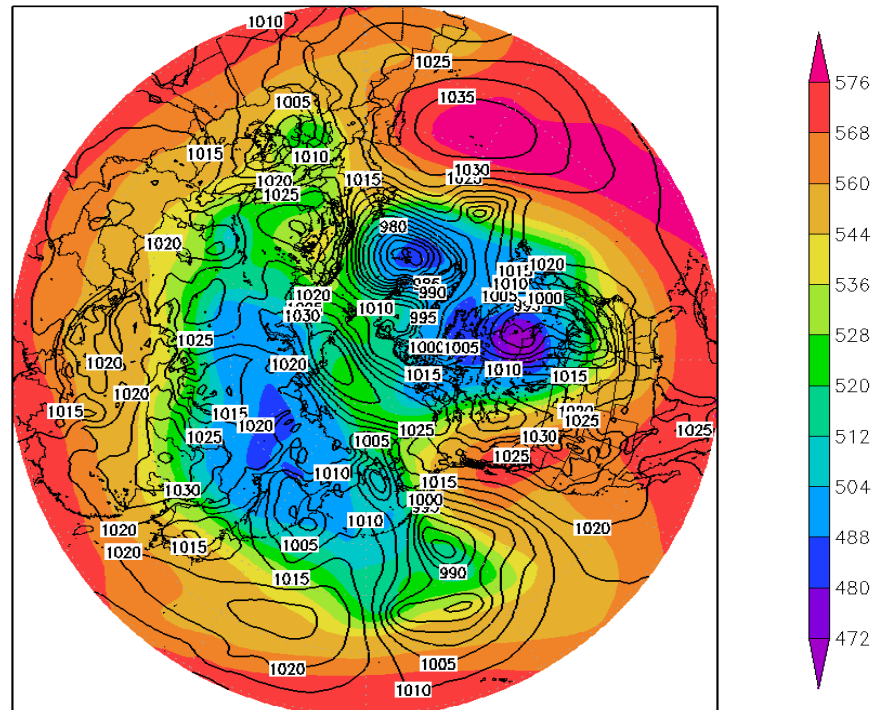
Σχήμα 3.29: Θερμοκρασία 2μ επιφανείας (°C) στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής 29/01/2014, 00Z

Η περίοδος αναφοράς χαρακτηρίστηκε και από υψηλές πιέσεις στη μέση στάθμη θάλασσας στην περιοχή της δυτικής βόρειας Αμερικής καθώς και επέκταση αυτών στην περιοχή της Αρκτικής. Υψηλές τιμές γεωδυναμικών υψών παρατηρήθηκαν επίσης στη στάθμη των 500hPa στην περιοχή της Αρκτικής με μετατόπιση του πολικού στροβίλου προς την περιοχή του Καναδά. Αυτό είχε ως συνέπεια αρκτικές αέριες μάζες να μετατοπιστούν νοτιότερα. Οι παρατηρήσεις αυτές οπτικοποιούνται στα σχήματα 3.30-3.35.

Geop Height(gpdm) & SLP 24/01/201400Z

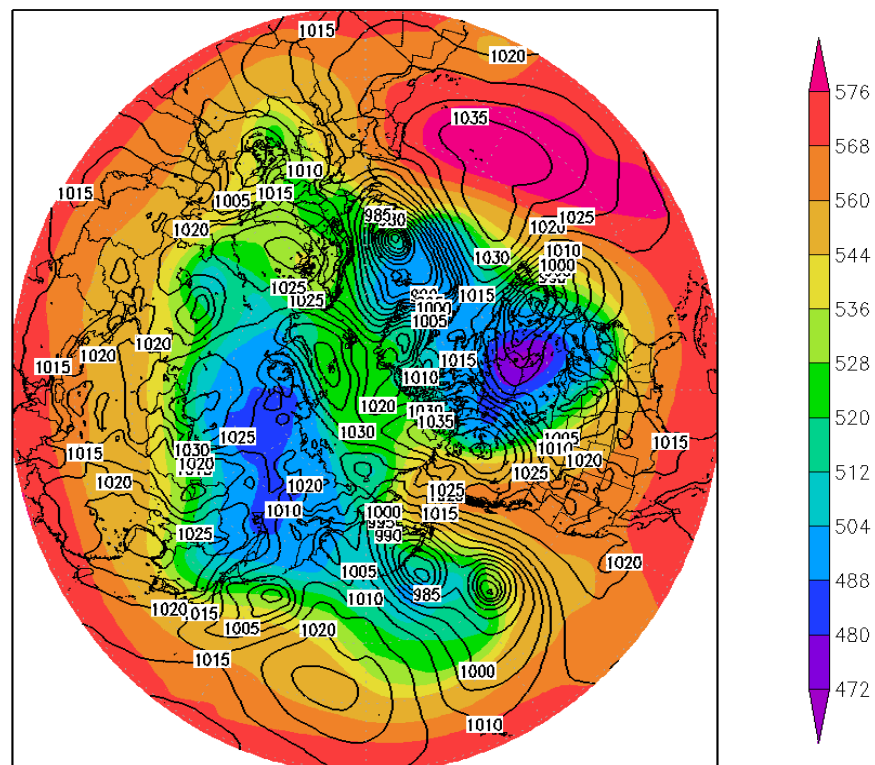


Geop Height(gpdm) & SLP 25/01/201400Z



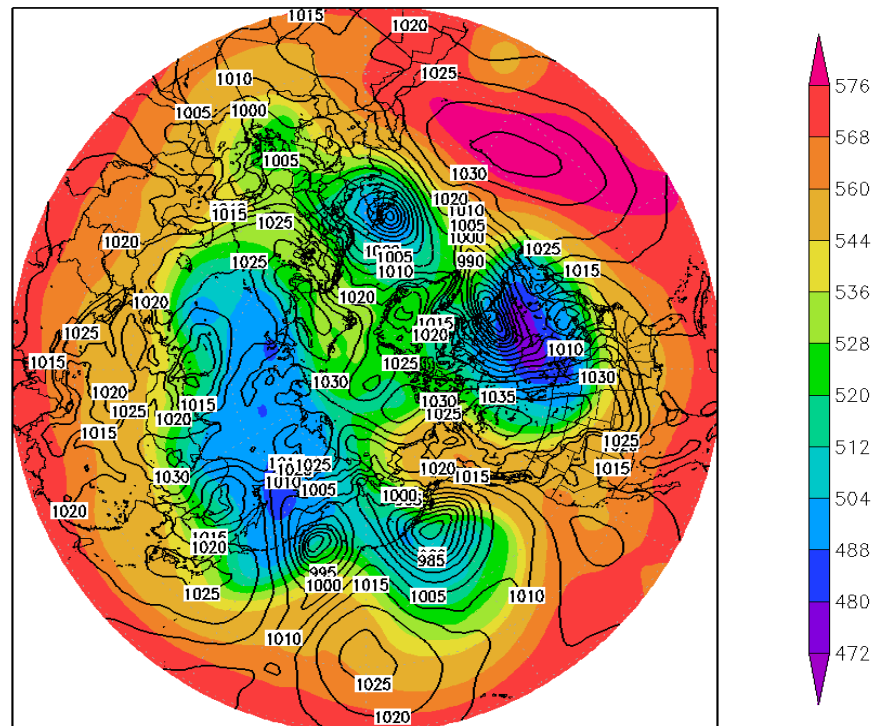
Σχήμα 3.31: Πιέσεις στη μέση στάθμη θάλασσας (hPa) για το βόρειο ημισφαίριο καθώς και γεωδυναμικά ύψη (gpdm) στη στάθμη των 500 hPa, 25/01/2014, 00Z

Geop Height(gpdm) & SLP 26/01/201400Z



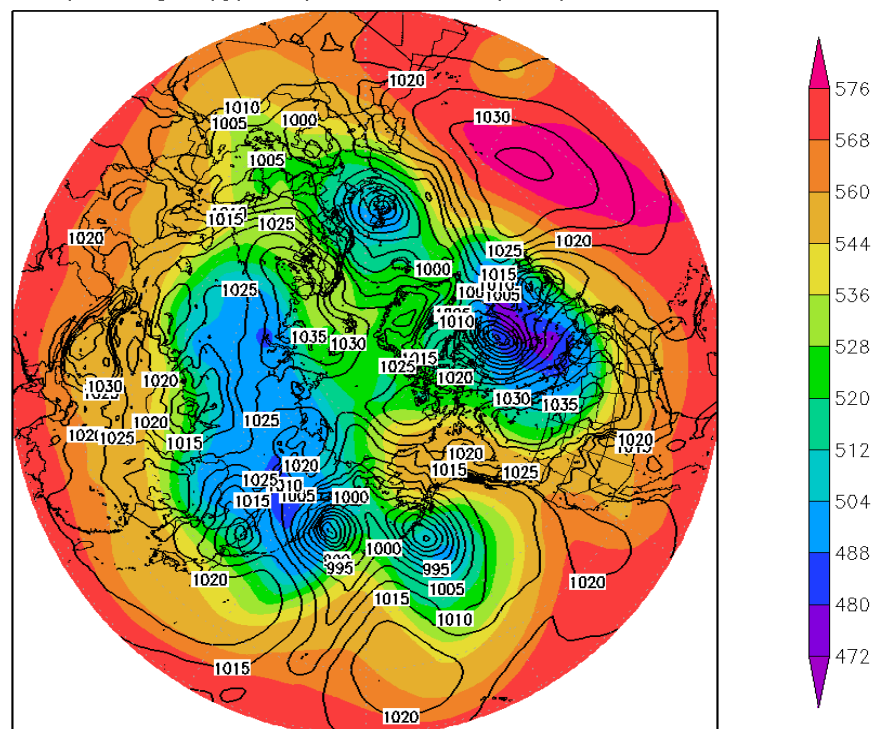
Σχήμα 3.32: Πιέσεις στη μέση στάθμη θάλασσας (hPa) για το βόρειο ημισφαίριο καθώς και γεωδυναμικά ύψη (gpdm) στη στάθμη των 500 hPa, 26/01/2014, 00Z

Geop Height(gpdm) & SLP 27/01/201400Z



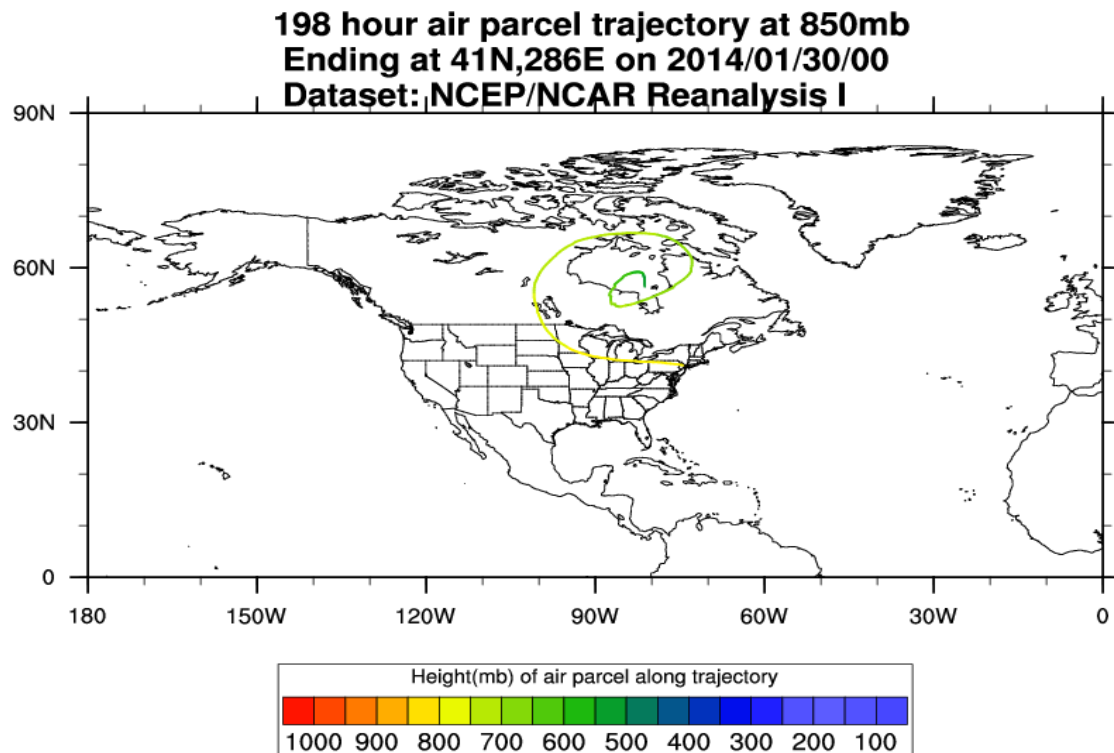
Σχήμα 3.33: Πιέσεις στη μέση στάθμη θάλασσας (hPa) για το βόρειο ημισφαίριο καθώς και γεωδυναμικά ύψη (gpdm) στη στάθμη των 500 hPa, 27/01/2014, 00Z

Geop Height(gpdm) & SLP 27/01/201412Z

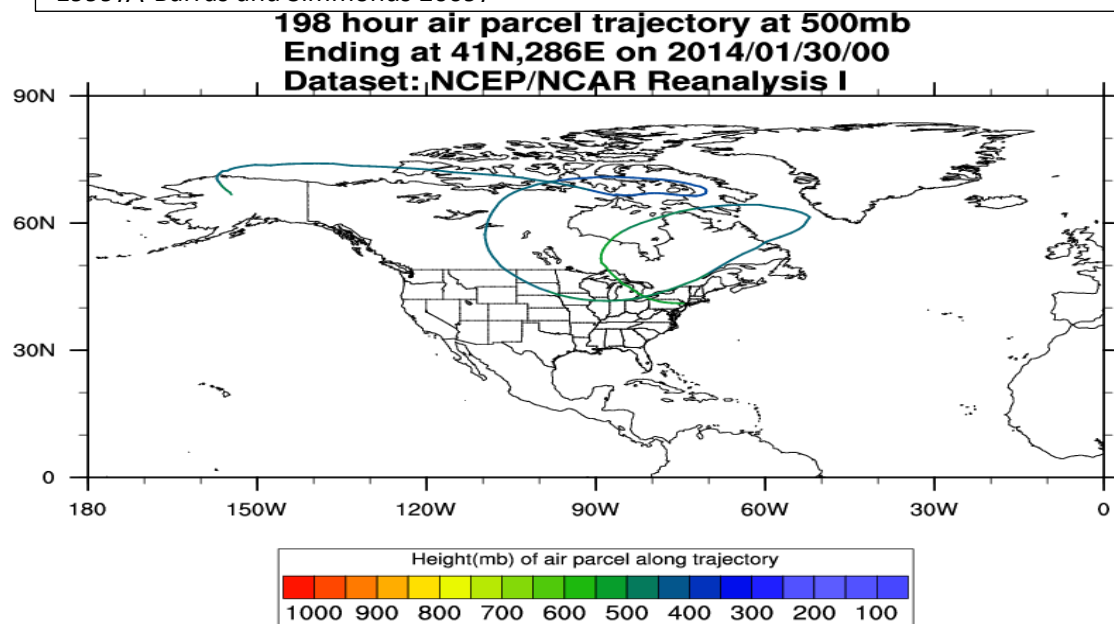


Σχήμα 3.34: Πιέσεις στη μέση στάθμη θάλασσας (hPa) για το βόρειο ημισφαίριο καθώς και γεωδυναμικά ύψη (gpdm) στη στάθμη των 500 hPa, 27/01/2014, 12Z

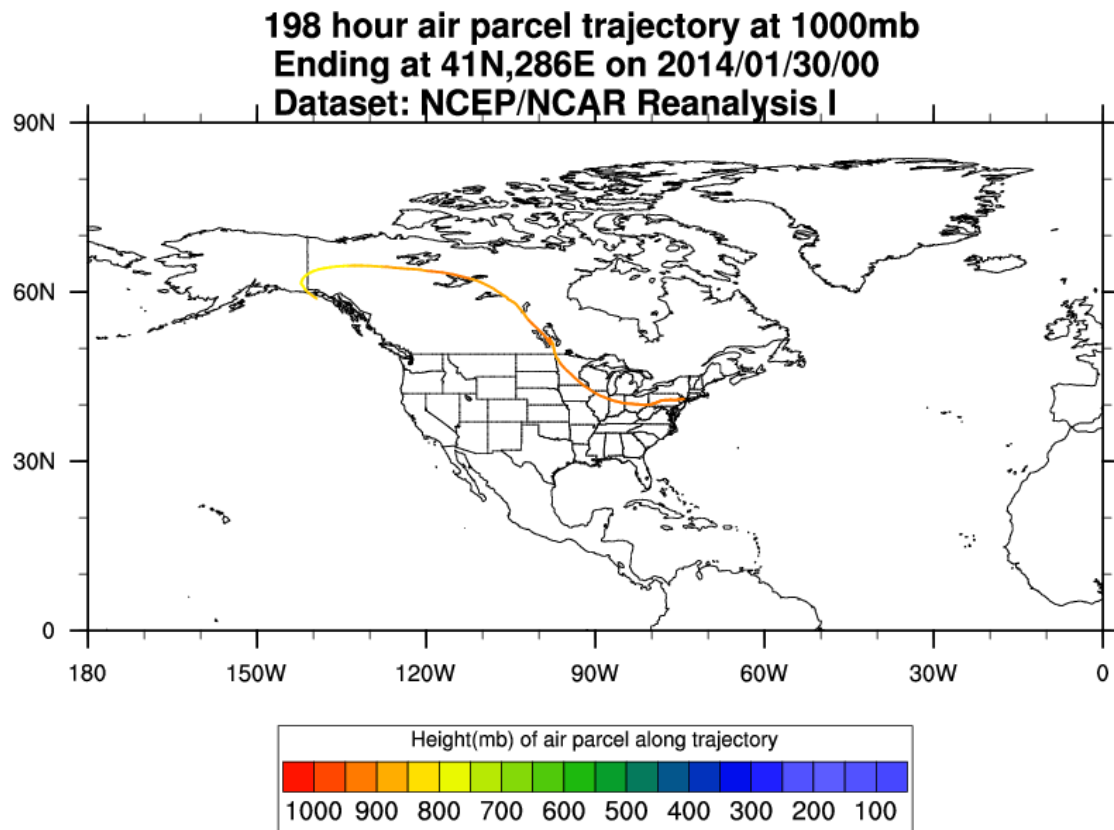
Τέλος προκειμένου να δούμε την προέλευση των αερίων μαζών στις ακτές της Ανατολικής Βόρειας Αμερικής κατά τη διάρκεια της ψυχρής εισβολής δημιουργήθηκαν ‘back trajectories’ (<http://www.cycstats.org/trajectories/trajhome.htm>) για τρεις διαφορετικές στάθμες, στα 1000hPa, 850hPa και 500hPa. Το λογισμικό το οποίο έχει δημιουργηθεί από ομάδα του Πανεπιστημίου της Μελβούρνης υπολογίζει την προέλευση μιας αέριας μάζας δοθέντων των αρχικών συνθηκών, του αρχικού χρόνου και της αρχικής στάθμης στην ατμόσφαιρα. Έτσι όπως φαίνεται και στα σχήματα 3.36-3.39 υπολογίσθηκαν οι προέλευσης των αερίων μαζών που βρίσκονταν στις 30 Ιανουαρίου του 2014 πάνω από την Νέα Υόρκη στις τρεις διαφορετικές στάθμες που ήδη αναφέρθηκαν. Παρατηρείται ξεκάθαρα ότι και στις τρεις περιπτώσεις οι αέριες μάζες προέρχονται από βορειότερα γεογραφικά πλάτη κάτι το οποίο είναι λογικό καθώς η ψυχρή εισβολή έλαβε χώρα από τις 24 έως τις 30 του μηνός.



Σχήμα 3.36: Back-trajectory για την αέρια μάζα που βρισκόταν πάνω από την Νέα Υόρκη στις 30/01/2014 και ώρα 00Z στην στάθμη των 850hPa. Η πορεία της αέριας μάζας ακολουθείται για τις προηγούμενες 198 ώρες και τα μετεωρολογικά δεδομένα προέρχονται από δεδομένα αναλύσεων του NCEP. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται προέρχεται από το Πανεπιστήμιο της Μελβούρνης, <http://www.earthsci.unimelb.edu.au/trajectories/trajhome.htm>. (Noone and Simmonds 1999). (Barras and Simmonds 2009)



Σχήμα 3.37: Back-trajectory για την αέρια μάζα που βρισκόταν πάνω από την Νέα Υόρκη στις 30/01/2014 και ώρα 00Z στην στάθμη των 500hPa. Η πορεία της αέριας μάζας ακολουθείται για τις προηγούμενες 198 ώρες και τα μετεωρολογικά δεδομένα προέρχονται από δεδομένα αναλύσεων του NCEP. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται προέρχεται από το Πανεπιστήμιο της Μελβούρνης, <http://www.earthsci.unimelb.edu.au/trajectories/trajhome.htm>. (Noone and Simmonds 1999), (Barras and Simmonds 2009)



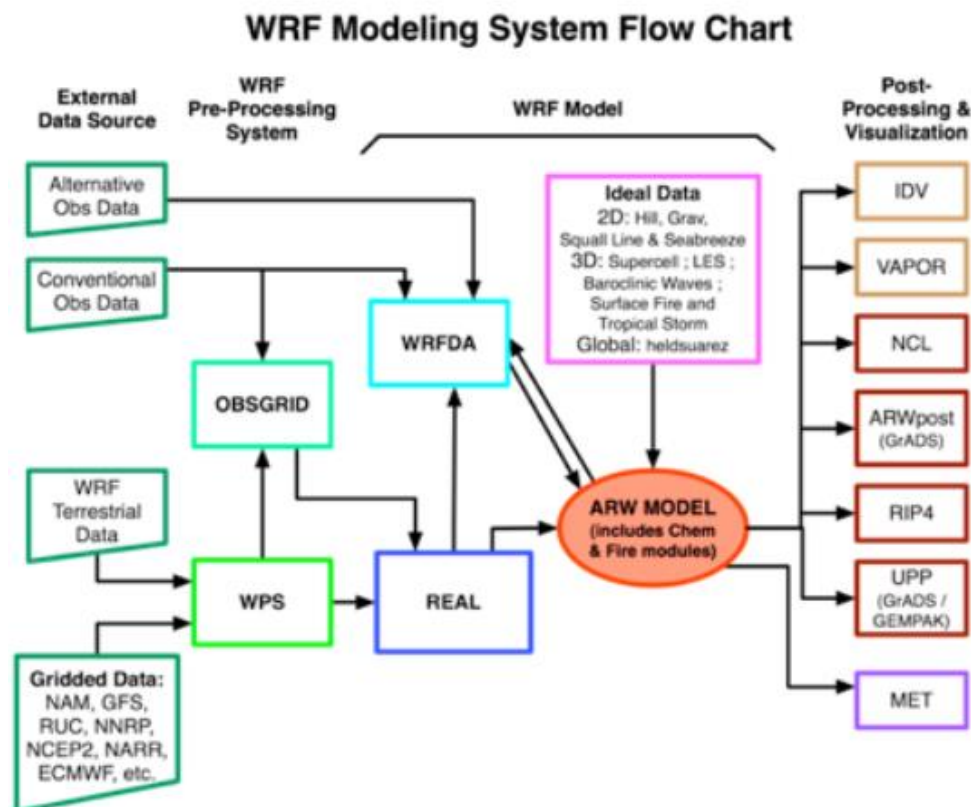
Σχήμα 3.38: Back-trajectory για την αέρια μάζα που βρίσκotan πάνω απο την Νέα Υόρκη στις 30/01/2014 και ώρα 00Z στην στάθμη των 500hPa. Η πορεία της αέριας μάζας ακολουθείται για τις προηγούμενες 198 ώρες και τα μετεωρολογικά δεδομένα προέρχονται απο δεδομένα αναλύσεων του NCEP. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται προέρχεται απο το Πανεπιστήμιο της Μελβούρνης, (<http://www.earthsci.unimelb.edu.au/trajectories/trajhome.htm>). (Noone and Simmonds 1999), (Barras and Simmonds 2009)

4 Weather Research & Forecasting Model (WRF)

Το μοντέλο WRF είναι ένα μέσης κλίμακας αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού το οποίο είναι σχεδιασμένο για την πραγματοποίηση έρευνας στο πεδίο της ατμόσφαιρας καθώς και για επιχειρησιακές προγνώσεις. Εξυπηρετεί μεγάλο εύρος ατμοσφαιρικών εφαρμογών με κλίμακα από μερικές δεκάδες μέτρα έως χιλιάδες χιλιόμετρα. Η δημιουργία του χρονολογείται στα μέσα της δεκαετίας του 1990 και προέκυψε από συνεργασία του NCAR (National Centre for Atmospheric Research) και του NCEP (National Oceanic and Atmospheric Administration, ενώ διαδοχικές βελτιώσεις του μοντέλου συνεχίζονται έως και σήμερα (Skamarock 2004). Το μοντέλο WRF μπορεί να επιτελεί προσομοιώσεις της ατμόσφαιρας χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα (παρατηρήσεις, reanalysis) ή συγκεκριμένες ιδεατές αρχικές συνθήκες. Αυτή τη στιγμή χρησιμοποιείται επιχειρησιακά σε αρκετά κέντρα παγκοσμίως. Παρέχει δύο δυναμικούς πυρήνες επίλυσης των βασικών εξισώσεων τον ARW (Advanced Research WRF) και τον NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model). Ο πρώτος χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

4.1 Τμήματα και υποπρογράμματα του μοντέλου WRF

Το WRF αποτελείται από υποπρογράμματα τα οποία επιτελούν ένα ρόλο το καθένα έτσι ώστε να προκύψει η τελική πρόγνωση. Στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 4.39 παρουσιάζονται τα υποπρογράμματα του μοντέλου.

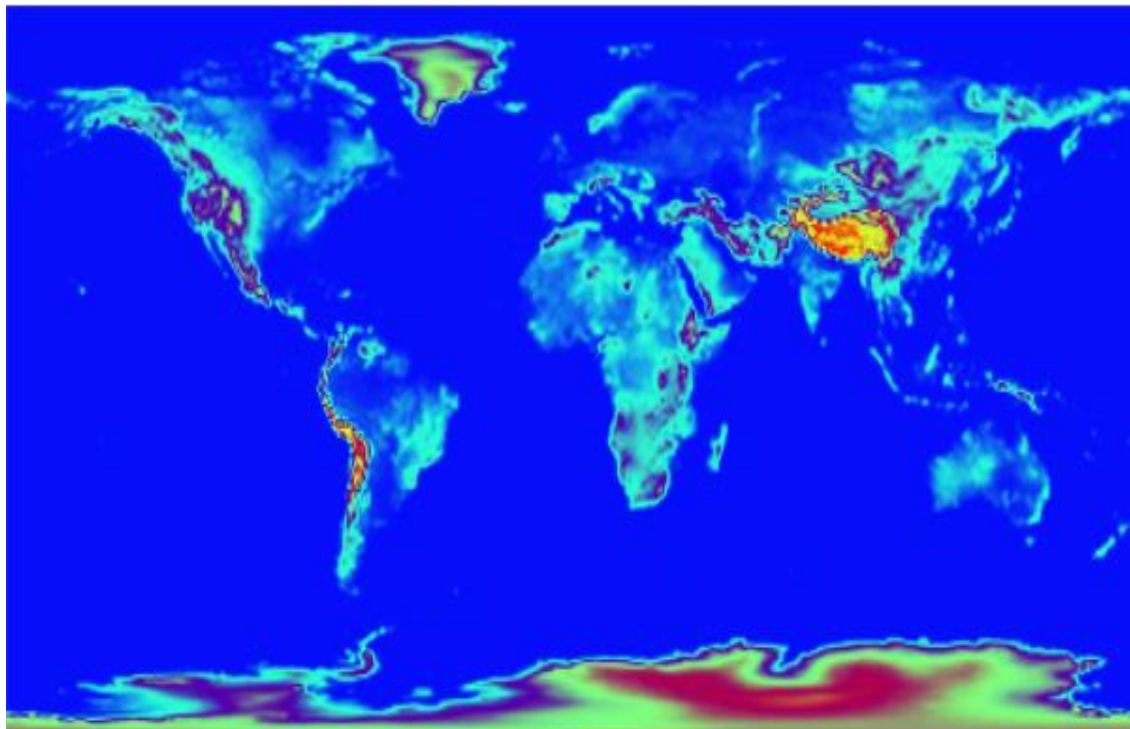


Σχήμα 4.39: Διάγραμμα ροής του μοντέλου WRF. Πηγή: NCAR (Skamarock 2004)

Το WRF αποτελείται από τρεις βασικές συνιστώσες: Το WPS (WRF Pre-Processing System), το REAL και τέλος των πυρήνα επίλυσης ARW. Το WPS χωρίζεται σε τρία διαφορετικά μέρη:

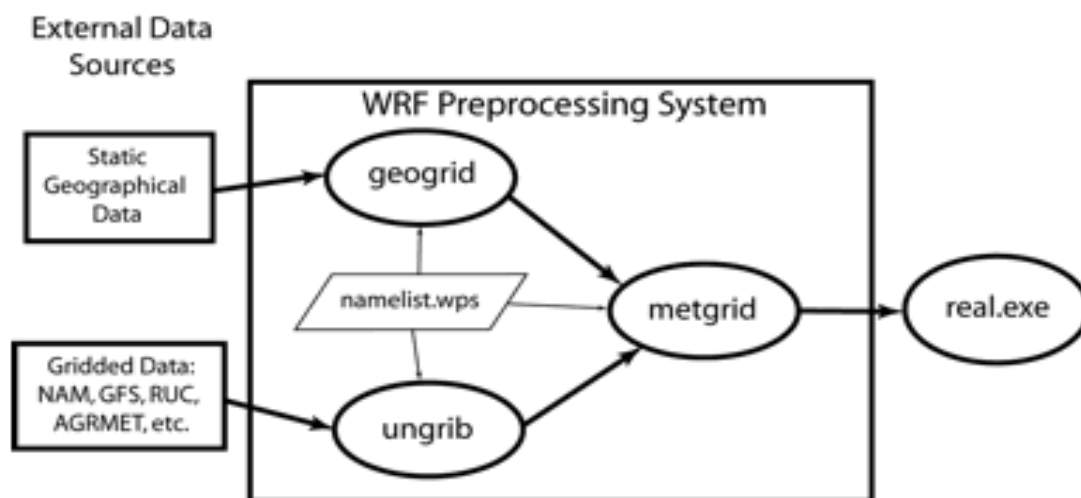
- Geogrid
- Ungrib
- metgrid

Σκοπός της ύπαρξης του geogrid είναι ο ορισμός αρχικά της περιοχής ολοκλήρωσης του μοντέλου (domain) καθώς και η διακριτοποίηση της περιοχής αυτής σε σημεία πλέγματος τα οποία απέχουν μια απόσταση μεταξύ τους (χωρική διακριτοποίηση του μοντέλου). Στην περίπτωση της συγκεκριμένης εργασίας η περιοχή ολοκλήρωσης ήταν παγκόσμια (Σχήμα 4.40), δηλαδή η πρόγνωση και η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων πραγματοποιούνταν σε ολόκληρη τη γη. Η χωρική διακριτοποίηση του μοντέλου ορίστηκε στις 0.75 μοίρες στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις, ήτοι περίπου 83 χιλιόμετρα στο γεωγραφικό πλάτος.



Σχήμα 4.40: Η περιοχή ολοκλήρωσης του μοντέλου WRF που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Στο geogrid επίσης παρέχονται δεδομένα σε κάθε σημείο πλέγματος για το υψόμετρο της περιοχής, το είδος του εδάφους καθώς και τη χρήση του εδάφους.



Σχήμα 4.41: WPS WRF Pre-Proccecing System. Πηγή: (Wang et al. 2016)

namelist, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.41. Η namelist περιέχει στοιχεία ξεχωριστά για κάθε πρόγραμμα του WPS καθώς και ένα μέρος με κοινά στοιχεία τα οποία μοιράζονται και τα τρία προγράμματα.

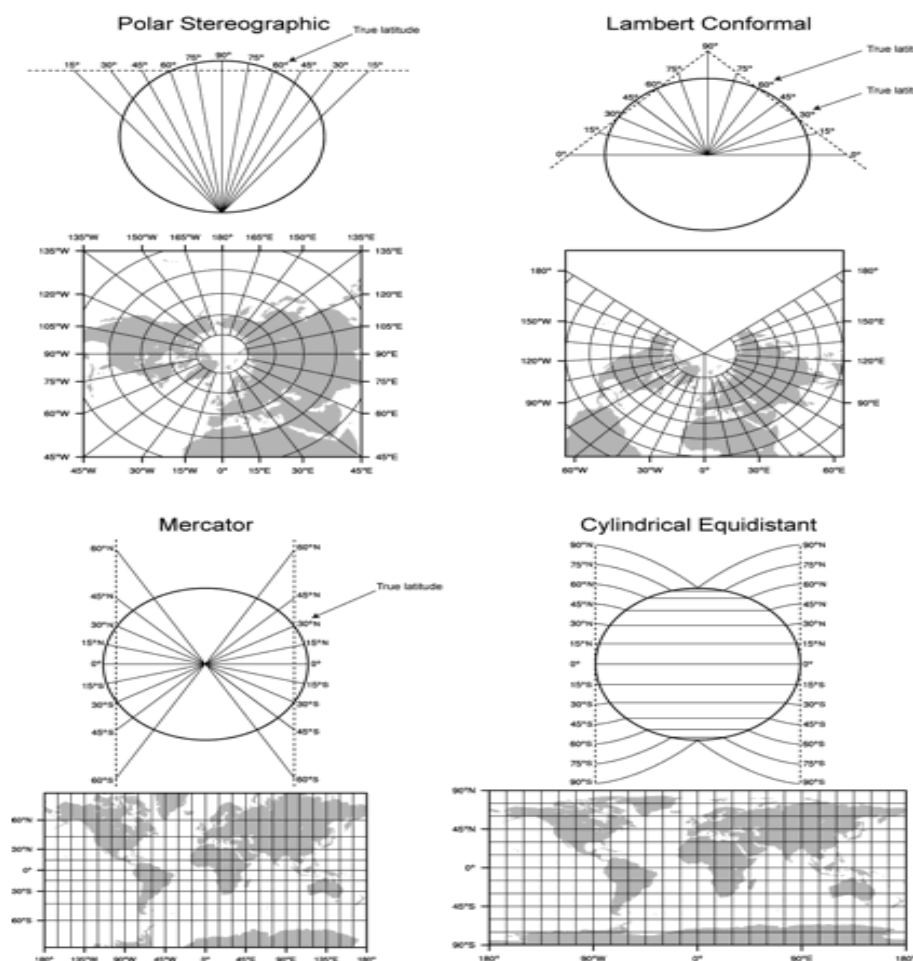
Το πρόγραμμα με όνομα ungrib διαβάζει αρχεία τύπου GRIB και τα μετατρέπει σε μια μορφή, η οποία είναι ικανή να διαβαστεί από το WRF. Τα αρχεία τύπου GRIB περιέχουν μεταβλητές μετεωρολογικών πεδίων (χρονοεξαρτημένες) και προέρχονται συνήθως από ένα άλλο περιοχικό ή παγκόσμιο μοντέλο πρόγνωσης, όπως για παράδειγμα το GFS (Global Forecasting System). Τα αρχεία GRIB περιέχουν συνήθως περισσότερα πεδία από αυτά που είναι αναγκαία για να χρησιμοποιηθούν ως αρχικές συνθήκες από το μοντέλο WRF. Το πρόγραμμα ungrib χρησιμοποιεί κάποιους πίνακες, με όνομα Vtable's, έτσι ώστε να αναγνωρίσει ποιές μεταβλητές θα χρησιμοποιήσει από τα αρχεία grib προκειμένου να δημιουργήσει τα ενδιάμεσα αρχεία.

Στη συνέχεια και αφού πρώτα έχει οριστεί και διακριτοποιηθεί η περιοχή ολοκλήρωσης που θα χρησιμοποιηθεί από το geogrid και έχουν δημιουργηθεί τα ενδιάμεσα αρχεία από το πρόγραμμα ungrib, το πρόγραμμα metgrid περνά τα πεδία των μετεωρολογικών μεταβλητών στη διακριτοποιημένη περιοχή ολοκλήρωσης του μοντέλου έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν ως αρχικές (και πλευρικές για προσομοιώσεις/προγνώσεις περιορισμένης περιοχής) συνθήκες για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων και συνεπώς για την αριθμητική πρόγνωση του μοντέλου. Από τη στιγμή που τα μετεωρολογικά πεδία είναι χρονοεξαρτημένα, το πρόγραμμα metgrid πρέπει να επαναλαμβάνεται σε κάθε καινούρια προσομοίωση που διεξάγεται από το μοντέλο. Καθώς η χωρική ανάλυση των αρχικών αρχείων GRIB και του μοντέλου ενδέχεται να είναι διαφορετική το αρχείο METGRID.TBL ελέγχει τη μέθοδο με την οποία θα παρεμβληθούν οι μετεωρολογικές μεταβλητές στο domain του μοντέλου. Μερικές από τις μεθόδους παρεμβολής που χρησιμοποιούνται είναι ο μέσος όρος τεσσάρων γειτονικών σημείων, οκτώ γειτονικών σημείων, δεκαέξι γειτονικών σημείων καθώς και συνδυασμός αυτών.

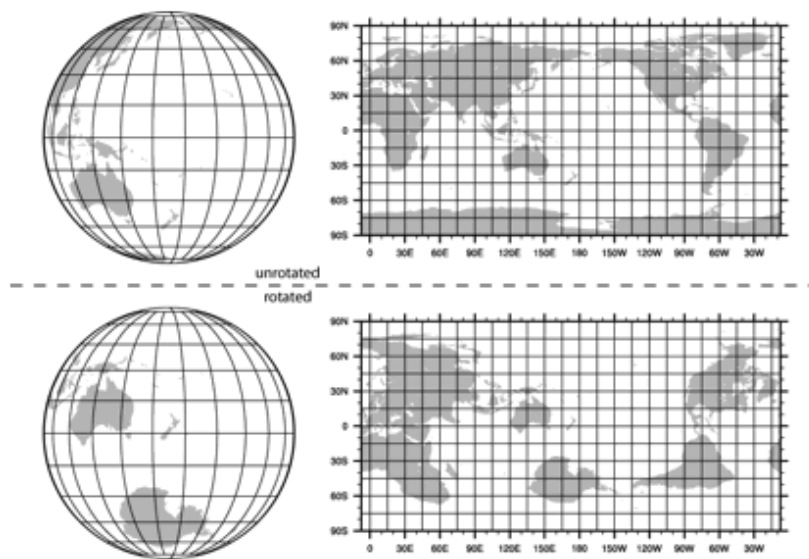
Επίσης στο αρχείο namelist, στον τομέα που αναφέρεται στο πρόγραμμα geogrid ορίζεται η προβολή του χάρτη (map projection) προσομοίωσης, όπως και το μέγεθος του domain (Σχήμα 4.42). Το WRF παρέχει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης μόνο της προβολής lat-lon σε παγκόσμιες προσομοιώσεις, για αυτό το λόγο στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το lat-lon map projection (Σχήμα 4.43).

4.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά μοντέλου

Όταν το WRF χρησιμοποιείται για περιοχική πρόγνωση εκτός από αρχικές συνθήκες για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων χρειάζονται και πλευρικές οριακές συνθήκες για την πραγματοποίηση προσομοίωσης. Στις προσομοιώσεις που έλαβαν χώρα στο πλαίσιο της εργασίας και οι οποίες έγιναν σε παγκόσμια περιοχή ολοκλήρωσης χρειάστηκαν μόνο αρχικές συνθήκες και όχι πλευρικές οριακές συνθήκες καθώς υπάρχει περιοδικότητα στα άκρα (το τελευταίο σημείο του πλέγματος σε ένα παράλληλο έχει τις ίδιες τιμές των πεδίων με το πρώτο σημείο πλέγματος). Οι αρχικές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη των διαδοχικών προσομοιώσεων είναι τα αρχεία Final Operational Global Analysis του NCEP με χωρική διακριτοποίηση $1^\circ \times 1^\circ$ γεωγραφικό πλάτος – γεωγραφικό μήκος (Skamarock 2004). Τα αρχεία εμπεριέχουν δεδομένα σε 27 διαφορετικά επίπεδα πίεσης από την επιφάνεια έως το ισοβαρικό επίπεδο των 10hPa. Είναι διαθέσιμα κάθε έξι ώρες και περιλαμβάνουν όλα τα απαραίτητα μετεωρολογικά πεδία που χρειάζονται έτσι ώστε να γίνει η αρχικοποίηση του μοντέλου WRF.

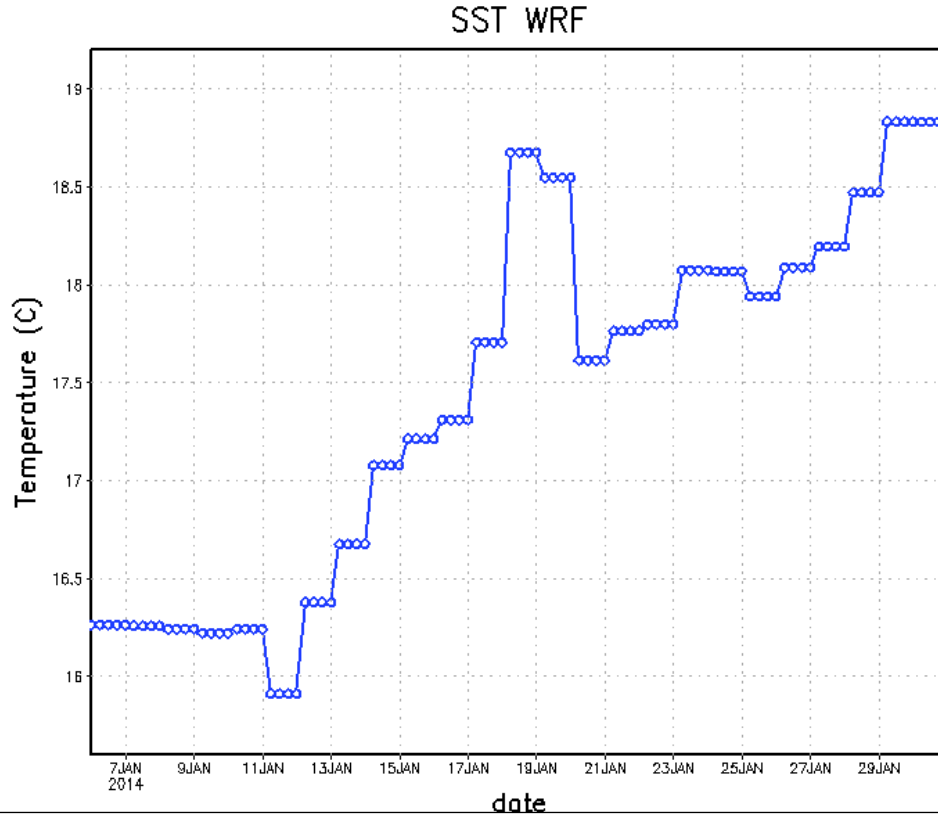


Εικόνα 4.42: Επιλογές προβολής χάρτη του μοντέλου WRF. Πηγή: NCAR (Wang et al. 2016)



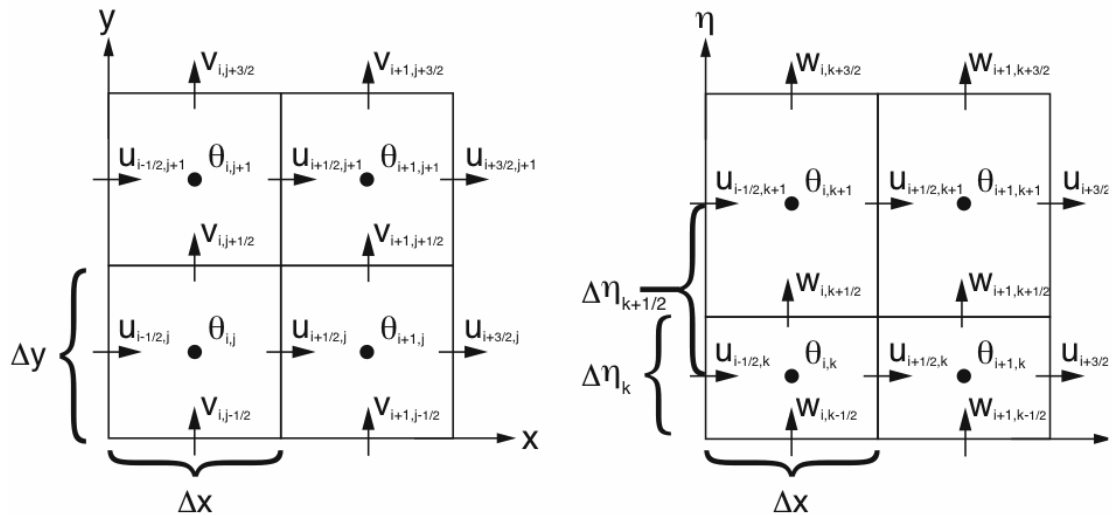
Σχήμα 4.43: 'lat-lon' προβολή χάρτη του μοντέλου WRF. Πηγή: (Wang et al. 2016)

Επίσης, για τη θεωρητική μελέτη της μέγιστης δυνατής προγνωσιμότητας του μοντέλου WRF σε μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη κλίμακα, στις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν πραγματικές θερμοκρασίες θάλασσας οι οποίες ανανεώνονταν κάθε 24 ώρες. Οι θερμοκρασίες επιφανείας θάλασσας που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από το NOAA, έχουν χωρική διακριτοποίηση 0.5 μοίρες και προκύπτουν από δεδομένα πλοίων και δορυφόρων (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/map/clim/sst.shtml>). Για τη θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας στην περίπτωση παγοκάλυψης χρησιμοποιούνται δεδομένα από παρατηρήσεις αλλά και δορυφορικά δεδομένα. Η καθημερινή ανανέωση των θερμοκρασιών θάλασσας φαίνεται στο Σχήμα 4.43, όπου κάθε 24 ώρες παρατηρείται μια ασυνεχής αλλαγή της θερμοκρασίας θάλασσας. Στο ενδιάμεσο οι θερμοκρασίες παραμένουν σταθερές.



Σχήμα 4.44: Θερμοκρασία θάλασσας από προσομοίωση του μοντέλου GWRF

Τέλος το πλέγμα που χρησιμοποιεί το μοντέλο WRF για την πραγματοποίηση της πρόγνωσης και την επίλυση των προγνωστικών εξισώσεων είναι το Arakawa C grid (Σχήμα 4.45).



Σχήμα 4.45: Η διάταξη των δυναμικών και θερμοδυναμικών μεταβλητών στο πλέγμα Arakawa C, οριζοντίως (αριστερό σχήμα) και κατακόρυφα (δεξί σχήμα) (Wang et al. 2016).

Σε αυτό το πλέγμα ο υπολογισμός της δυναμικής θερμοκρασίας γίνεται στο κέντρο της κυψελίδας, ενώ ο υπολογισμός της ταχύτητας κάθε συνιστώσας του ανέμου γίνεται στα άκρα της κυψελίδας.

Στη συνέχεια και αφού πρώτα έχουν παραχθεί σωστά τα κατάλληλα αρχεία από το WPS χρειάζεται να τρέξει το πρόγραμμα real του wrf, το οποίο παρεμβάλλει τις αρχικές τιμές των πεδίων στα κατακόρυφα επίπεδα του μοντέλου. Τα κατακόρυφα επίπεδα αλλά και άλλες μεταβλητές που καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο θα τρέξει το μοντέλο ορίζονται σε ένα αρχείο με όνομα “namelist.input”. Σε αυτό το αρχείο ορίζεται το χρονικό διάστημα για το οποίο θα τρέξει το μοντέλο, το χρονικό βήμα επίλυσης των προγνωστικών εξισώσεων του μοντέλου καθώς και η χωρική διακριτοποίηση. Επίσης, επειδή πολλές διαδικασίες της ατμόσφαιρας, όπως παραδείγματος χάρη διαδικασίες ανάπτυξης νεφών και αστάθειας, παράγονται μέσω παραμετροποιήσεων, ορίζεται η κάθε παραμετροποίηση φυσικής που θα λαμβάνει χώρα κατά το τρέξιμο του μοντέλου. Τέλος ορίζονται κάποια δυναμικά χαρακτηριστικά, όπως ο τρόπος υπολογισμού της τροπόπαυσης αλλά και διάφορα χαρακτηριστικά απόσβεσης της κατακόρυφης ταχύτητας. Τα βασικά χαρακτηριστικά που ορίστηκαν στο αρχείο αυτό για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά των προσομοιώσεων

Μοντέλο	GWRF
Οριζόντια διακριτοποίηση	0.75°x0.75°
Κατακόρυφη διακριτοποίηση	40 sigma-pressure επίπεδα έως τα 10hPa
Σημεία επίλυσης	481x241 (x & y διεύθυνση)
Χωρική διακριτοποίηση	83383.11 (m)
Χρονικό βήμα	240 sec
Σχήμα μικροφυσικής	Eta(Ferrier)
Σχήμα παραμετροποίησης Cumulus	Betts-Miller-Janjic
Προγνωστικός ορίζοντας	Από 20 έως 40 ημέρες
Χρονικές στιγμές αποτελεσμάτων	00, 06, 12 και 18UTC
Αρχικές συνθήκες	Final Analysis NCEP (0.75°x0.75°)
Επιφανειακή θερμοκρασία Θάλασσας(SST)	Ακολουθήθηκαν διαφορετικές διαδικασίες σε κάθε σετ προσομοιώσεων οι οποίες περιγράφονται στο κείμενο

Με την ολοκλήρωση και του προγράμματος real, πλέον τα ενδιαμέσα αρχεία είναι έτοιμα για να αρχίσει προσομοίωση με το μοντέλο WRF. Η διαδικασία της προσομοίωσης λαμβάνει χώρα διαμέσου του πυρήνα ARW με τη βοήθεια του οποίου γίνονται όλοι οι υπολογισμοί και η επίλυση των προγνωστικών εξισώσεων. Το πρόγραμμα ARW περιλαμβάνει τις βασικές εξισώσεις που διέπουν τις κινήσεις στην ατμόσφαιρα και επιλύονται με αριθμητικές μεθόδους. Οι εξισώσεις αυτές φαίνονται στο Σχήμα 4.46.

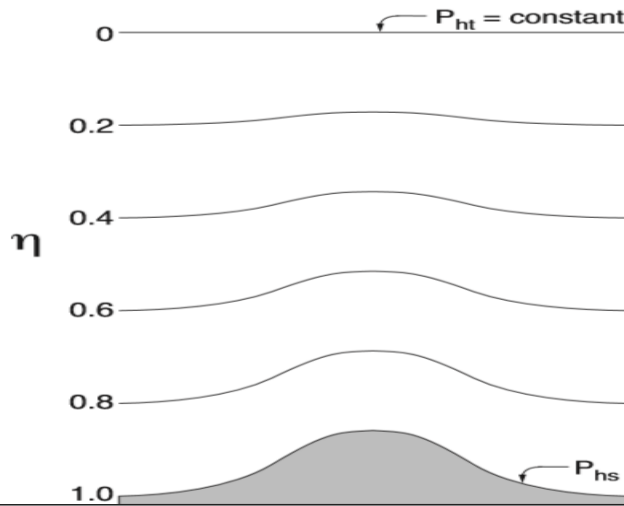
$$\begin{aligned}
\partial_t U + (\nabla \cdot \mathbf{V}u) - \partial_x(p\phi_\eta) + \partial_\eta(p\phi_x) &= F_U \\
\partial_t V + (\nabla \cdot \mathbf{V}v) - \partial_y(p\phi_\eta) + \partial_\eta(p\phi_y) &= F_V \\
\partial_t W + (\nabla \cdot \mathbf{V}w) - g(\partial_\eta p - \mu) &= F_W \\
\partial_t \Theta + (\nabla \cdot \mathbf{V}\theta) &= F_\Theta \\
\partial_t \mu + (\nabla \cdot \mathbf{V}) &= 0 \\
\partial_t \phi + \mu^{-1}[(\mathbf{V} \cdot \nabla \phi) - gW] &= 0
\end{aligned}$$

Σχήμα 4.46: Βασικές διαφορικές εξισώσεις κίνησης της ατμόσφαιρας. Πηγή: NCAR

Οι προγνωστικές μεταβλητές που υπολογίζει το πρόγραμμα είναι οι οριζόντιες συνιστώσες του ανέμου u και v καθώς και η κατακόρυφη συνιστώσα w , η δυναμική θερμοκρασία, το γεωδυναμικό και η πίεση του ξηρού αέρα στην επιφάνεια του εδάφους. Προαιρετικά το πρόγραμμα υπολογίζει την τυρβώδη κινητική ενέργεια και διάφορα μονόμετρα μεγέθη, όπως η αναλογία ανάμειξης υδρατμών. Η κατακόρυφη συντεταγμένη που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα είναι η σίγμα συντεταγμένη που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\eta = \frac{p_h - p_{ht}}{(p_{hs} - p_{ht})}$$

όπου p_h η πίεση στο ύψος η , p_{ht} η πίεση στην κορυφή του μοντέλου και p_{hs} η πίεση επιφανείας. Η μεταβλητή σίγμα παίρνει τιμές από 0 έως 1 και ακολουθεί την μορφολογία του εδάφους.



Σχήμα 4.47: ήτα κατακόρυφη μεταβλητή. Πηγή: (Skamarock 2004)

Η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων περιλαμβάνει τους όρους καμπυλότητας της γης στις διαφορικές εξισώσεις κίνησης. Τέλος στις παγκόσμιες προσομοιώσεις υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης φίλτρου Fourier στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, έτσι ώστε να αποφεύγεται η παραμόρφωση διάφορων μετεωρολογικών πεδίων αλλά και οι περιοδικές συνθήκες στα άκρα του πλέγματος.

5. Ανάλυση-Αποτελέσματα

5.1 Εισαγωγή

Για την εκπόνηση της παρούσης εργασίας, η οποία έχει ως στόχο την μελέτη της μεσοπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης προγνωσιμότητας του παγκόσμιου μοντέλου WRF, έλαβαν χώρα αρχικά 20 διαφορετικές προσομοιώσεις. Η πρώτη προσομοίωση έχει αρχικοποίηση στις 10 Ιανουαρίου του 2014 ενώ η τελευταία στις 22 Δεκεμβρίου του 2013. Το διάστημα το οποίο θέλουμε να προσομοιώσουμε είναι 25 με 29 Ιανουαρίου 2014. Μεταξύ των 20 αυτών προσομοιώσεων η μόνη διαφοροποίηση είναι οι αρχικές συνθήκες. Καθε μία προσομοίωση διαφέρει από την άλλη κατά 24 ώρες στις αρχικές συνθήκες. Αφού καλύφθηκε με προσομοιώσεις όλο το εύρος των 20 ημερών, οι διαφορετικές προσομοιώσεις χωρίστηκαν σε πεντάδες και για κάθε μια υπολογίστηκαν στατιστικά. Η κάθε πεντάδα προγνώσεων αντιπροσωπεύει και μια LAF. Η πρώτη LAF αναφέρεται στις προσομοιώσεις με αρχικοποίηση στο διάστημα 6-10 Ιανουαρίου του 2014 η δεύτερη στο διάστημα 1-5 Ιανουαρίου, η τρίτη στο διάστημα 27-31 Δεκεμβρίου 2013 ενώ η τελευταία αναφέρεται στο διάστημα 22-26 Δεκεμβρίου του 2013. Οι προσομοιώσεις αυτές έγιναν χρησιμοποιώντας τις πραγματικές θερμοκρασίες θάλασσας στο μοντέλο, οι οποίες ανανεώνταν κάθε 24 ώρες. Αυτό είχε ως σκοπό να δούμε την μέγιστη ικανότητα πρόγνωσης του μοντέλου για την περίοδο που μας ενδιαφέρει. Στη συνέχεια και με την χρήση στατιστικών μέτρων υπολογίστηκε η ικανότητα πρόγνωσης της περιόδου αναφοράς (25-29 Ιανουαρίου) από κάθε ξεχωριστή LAF. Όπως αναμενόταν η LAF με την καλύτερη προγνωστική ικανότητα ήταν αυτή που είχε αρχικοποίηση πιο κοντά στην περίοδο ενδιαφέροντος. Η LAF με την δεύτερη καλύτερη προγνωστική ικανότητα ήταν αυτή με αρχικές συνθήκες την περίοδο 1-5 Ιανουαρίου 2014 δηλαδή 20 με 25 μέρες πριν την περίοδο αναφοράς και χρησιμοποιήθηκε για περαιτέρω ανάλυση και μελέτη του φαινομένου. Για την περίοδο αυτή 10 επιπλέον προσομοιώσεις έλαβαν χώρα οι οποίες παρουσίαζαν κάποια διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σχέση με το αρχικό σετ των 20 προσομοιώσεων. Οι διαφοροποιήσεις αφορούν το πεδίο της θερμοκρασίας επιφανείας θάλασσας και για τις τελευταίες 10 προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν ssts οι οποίες έχουν προβλεφθεί με διαφορετικούς τρόπους και όχι οι πραγματικές (Thorncroft and Pytharoulis 2001). Έτσι αναμένεται η προγνωσιμότητα να είναι μειωμένη σε σχέση με τις πρώτες 20 προσομοιώσεις οι οποίες εμπεριείχαν τις πραγματικές θερμοκρασίες θάλασσας οι οποίες παρατηρήθηκαν κάθε ημέρα. Τέλος η προγνωστική ικανότητα των τελευταίων υπολογίστηκε και έγινε σύγκριση μεταξύ τους για να αποκαλυφθεί τυχόν ευαισθησία των προγνώσεων στις διαφορετικές παραμέτρους οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν. Όλα τα στατιστικά καθώς και τα σχήματα αναφέρονται στην περίοδο ενδιαφέροντος, 25-29 Ιανουαρίου 2014, και η σύγκριση γίνεται μεταξύ των προγνωστικών δεδομένων και των αναλύσεων του Ευρωπαϊκού κέντρου. Τέλος στην τελευταία ενότητα παρουσιάζεται η γραφική απεικόνιση των στατιστικών.

Πίνακας 5.1: Σύνολο προσομοιώσεων που έλαβαν χώρα για την εκπόνηση της εργασίας. Η πρώτη προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στις 10/01/2014 ενώ η τελευταία στις 22/12/2013. Οι προσομοιώσεις χωρίστηκαν σε πεντάδες και κάθε πεντάδα αποτελεί μια LAF. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 20 προσομοιώσεις έλαβαν χώρα με καθημερινή ανανέωση των ssts, ενώ για τα άλλα δύο πειράματα προσομοιώσεις μόνο το διάστημα 01-05/01/2014 πραγματοποιήθηκαν.

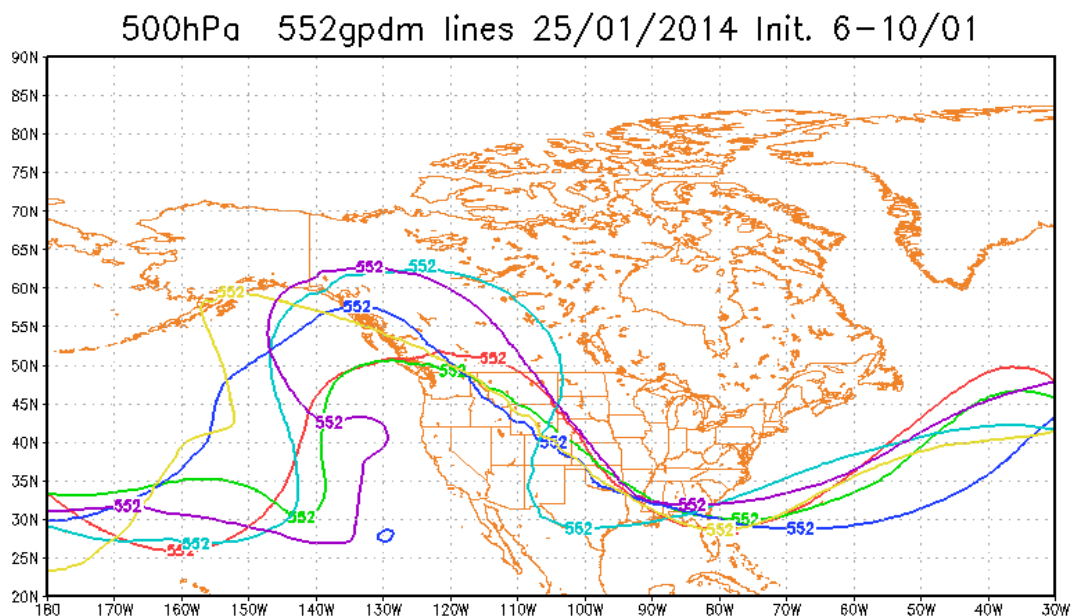
Ομάδα Στοχαστικής Πρόγνωσης	Ημερομηνία Αρχικοποίησης (00 UTC)	ΜΕΘΟΔΟΣ 1: Πραγματικές ΕΘΘ	ΜΕΘΟΔΟΣ 2: WRF ΕΘΘ	ΜΕΘΟΔΟΣ 3: Διατηρούμενες ανωμαλίες ΕΘΘ
LAF4	22/12/2013	NAI	OXI	OXI
LAF4	23/12/2013	NAI	OXI	OXI
LAF4	24/12/2013	NAI	OXI	OXI
LAF4	25/12/2013	NAI	OXI	OXI
LAF4	26/12/2013	NAI	OXI	OXI
LAF3	27/12/2013	NAI	OXI	OXI
LAF3	28/12/2013	NAI	OXI	OXI
LAF3	29/12/2013	NAI	OXI	OXI
LAF3	30/12/2013	NAI	OXI	OXI
LAF3	31/12/2013	NAI	OXI	OXI
LAF2	01/01/2014	NAI	NAI	NAI
LAF2	02/01/2014	NAI	NAI	NAI
LAF2	03/01/2014	NAI	NAI	NAI
LAF2	04/01/2014	NAI	NAI	NAI
LAF2	05/01/2014	NAI	NAI	NAI
LAF1	06/01/2014	NAI	OXI	OXI
LAF1	07/01/2014	NAI	OXI	OXI
LAF1	08/01/2014	NAI	OXI	OXI
LAF1	09/01/2014	NAI	OXI	OXI
LAF1	10/01/2014	NAI	OXI	OXI

5.2 Spaghetti plots

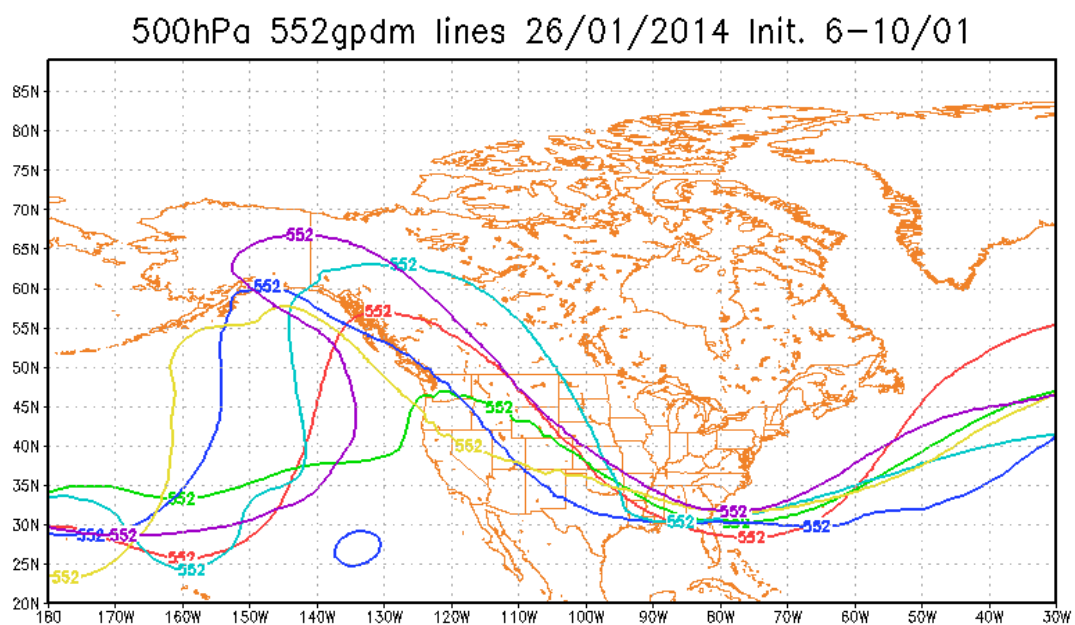
Τα spaghetti plots χρησιμοποιούνται ευρέως στη μετεωρολογία και προέρχονται κυρίως από ensembles (Katsafados 2014). Μια μετεωρολογική μεταβλητή όπως η πίεση, η θερμοκρασία ή ο υετός σχεδιάζεται σε ένα χάρτη για ένα σύνολο προσομοιώσεων και είναι δυνατόν να ελεγχθεί η ικανότητα πρόγνωσης του μοντέλου ή να αναγνωριστούν διάφορα μοτίβα (pattern), όπως παραδείγματος χάρη αντικυκλώνες και κυκλώνες. Εάν υπάρχει συμφωνία μεταξύ των διαφορετικών καμπυλών τότε η ικανότητα πρόγνωσης είναι μεγάλη, ενώ αν οι καμπύλες παρουσιάζουν χαοτική κατανομή το επίπεδο εμπιστοσύνης της πρόγνωσης είναι μικρό. Τα spaghetti plots πολλές φορές προτιμούνται από τα κλασικά ensembles ιδίως για τον καθορισμό της έντασης αντικυκλώνων και κυκλώνων ή ραχών και σκαφών ανώτερης ατμόσφαιρας.

Για την εκπόνηση της παρούσης εργασίας δημιουργήθηκαν για κάθε LAF, δηλαδή για κάθε πεντάδα ξεχωριστών προσομοιώσεων, spaghetti plots για τις ημερομηνίες 25-29 Ιανουαρίου 2014. Οι καμπύλες των χαρτών αναπαριστούν τη θέση της ισοψούς 552 gpdm στα 500hPa. Η 552 διαλέχθηκε καθώς αναπαριστά ένα μέσο γεωδυναμικό ύψος που διαχωρίζει αυλώνες και ράχες. Συνήθως χαμηλότερες τιμές από 552gpdm αντιστοιχούν σε αυλώνες στη μέση και ανώτερη τροπόσφαιρα, ενώ μεγαλύτερες τιμές αντιστοιχούν σε ράχες. Η περιοχή ενδιαφέροντος είναι η Βόρεια Αμερική ενώ για κάθε LAF δημιουργήθηκε ένα spaghetti plot για κάθε μια από τις ημερομηνίες 25 με 29 Ιανουαρίου.

Η πρώτη LAF αποτελείται από τις προσομοιώσεις που έλαβαν χώρα από τις 6 Ιανουαρίου 2014 έως τις 10 Ιανουαρίου 2014. Κάθε προσομοίωση άρχισε από τις 00UTC της εκάστοτε ημέρας. Παρακάτω ακολουθούν τα spaghetti plots της πρώτης LAF, Σχήματα 5.1-5.5.

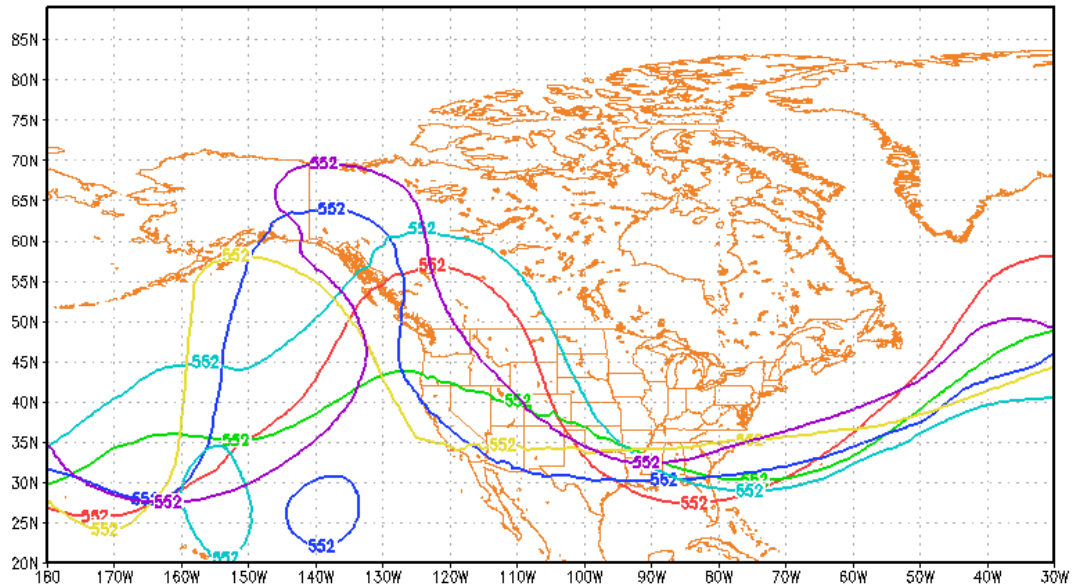


Σχήμα 5.1: Μεσοποιημένη ημερήσια χωρική κατανομή της ισοψούς 552gpdm στα 500hPa για τα μέλη της πρώτης LAF για τις 25/01/2014. Το μωβ χρώμα αντιστοιχεί στα δεδομένα των αναλύσεων για τις ημερομηνίες 25 με 29 Ιανουαρίου. Το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στην προσομοίωση που άρχισε στις 10 Ιανουαρίου του 2014, το πράσινο χρώμα στην προσομοίωση που έλαβε χώρα στις 09 Ιανουαρίου του 2014, το μπλε στις 08 Ιανουαρίου 2014, το γαλάζιο στις 07 Ιανουαρίου 2014 και τέλος το κίτρινο στις 06 Ιανουαρίου του 2014.



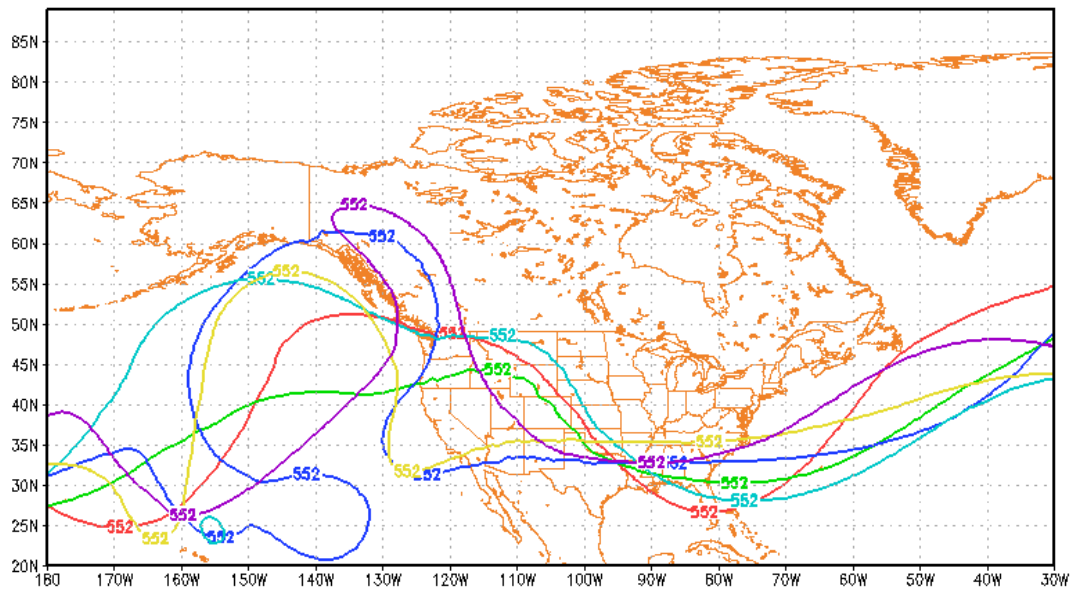
Εικόνα 5.2: Ομοίως με Σχήμα 5.1 για τις 26/01/2014

500hPa 552gpdm lines 27/01/2014 Init. 6-10/01

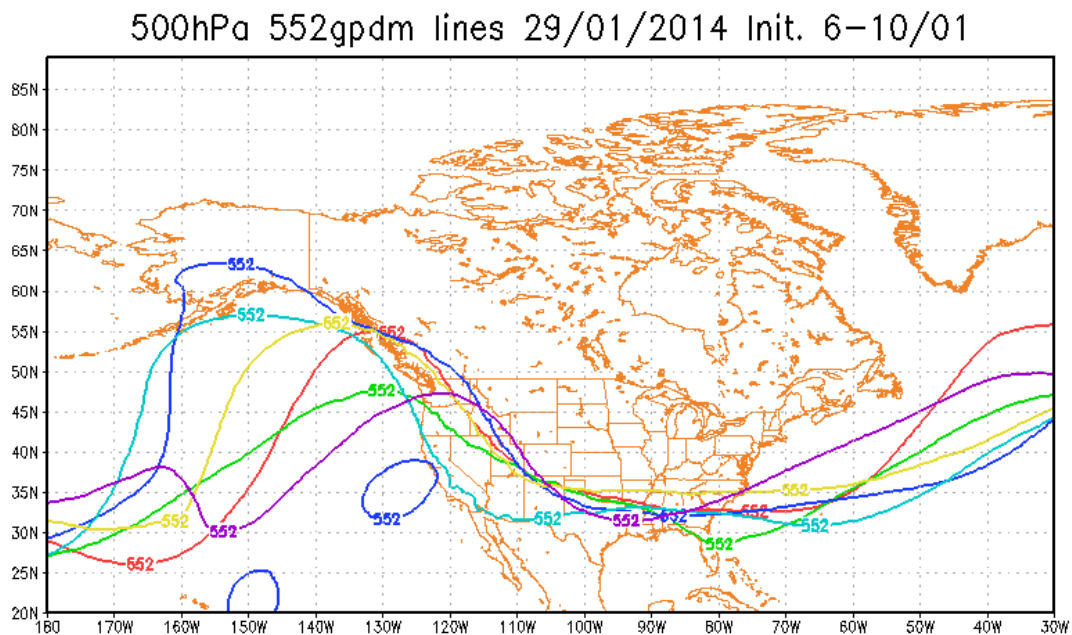


Σχήμα 5.3: Ομοίως με Σχήμα 5.1 για τις 27/01/2014

500hPa 552gpdm lines 28/01/2014 Init. 6-10/01



Σχήμα 5.4: Ομοίως με Σχήμα 5.1 για τις 28/01/2014

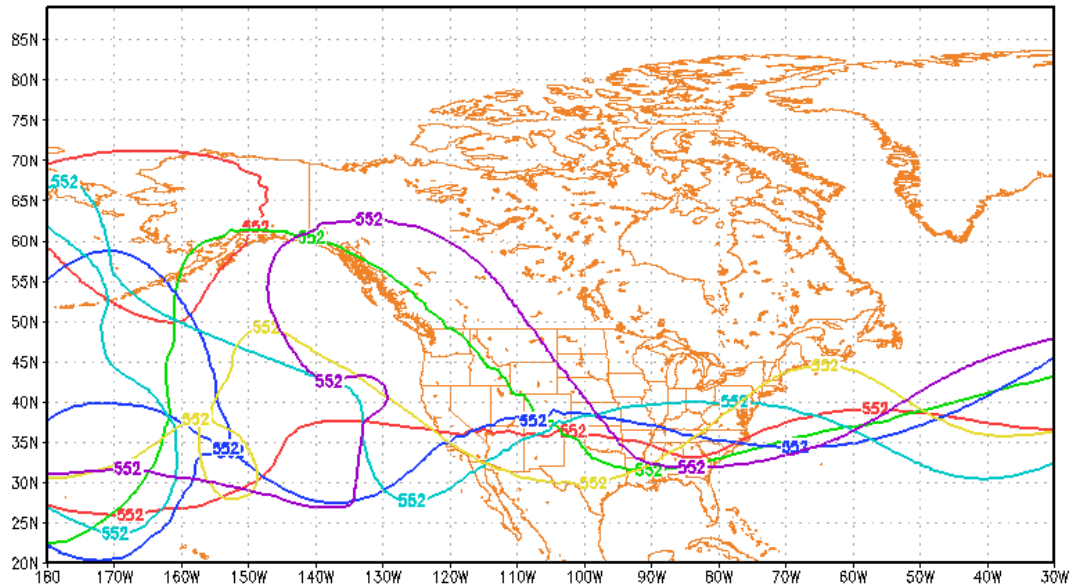


Εικόνα 5.5: Ομοίως με Σχήμα 5.1 για τις 29/01/2014

Κάθε διαφορετικό χρώμα καμπύλης αντιστοιχεί και σε διαφορετική προσομοίωση. Το μωβ χρώμα αντιστοιχεί στα δεδομένα των αναλύσεων για τις ημερομηνίες 25 με 29 Ιανουαρίου. Το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στην προσομοίωση που άρχισε στις 10 Ιανουαρίου του 2014, το πράσινο χρώμα στην προσομοίωση που έλαβε χώρα στις 09 Ιανουαρίου του 2014, το μπλε στις 08 Ιανουαρίου 2014, το γαλάζιο στις 07 Ιανουαρίου 2014 και τέλος το κίτρινο στις 06 Ιανουαρίου του 2014. Από τα διαγράμματα παρατηρείται ότι υπάρχει αρκετά μεγάλη συμφωνία για τη θέση της 552 από την Κεντρική Αμερική και ανατολικότερα, ενώ μια διασπορά στη θέση της παρατηρείται στις Δυτικές ακτές της Βορείου Αμερικής. Ο αυλώνας φαίνεται καλά καθορισμένος. Από την άλλη όλα τα μέλη δείχνουν την ύπαρξη ράχης στη Δυτική πλευρά της Βορείου Αμερικής και η διαφωνία βρίσκεται στη θέση αυτής. Παρατηρείται λοιπόν ότι η πρώτη LAF μπορεί να προβλέψει σε αρκετά μεγάλο βαθμό την επικρατούσα κυκλοφορία στη Βόρεια Αμερική, την περίοδο 25-29 Ιανουαρίου, με τον αντικυκλώνα στη Δυτική πλευρά αυτής και τον αυλώνα στην Κεντρική και Ανατολική Βόρεια Αμερική.

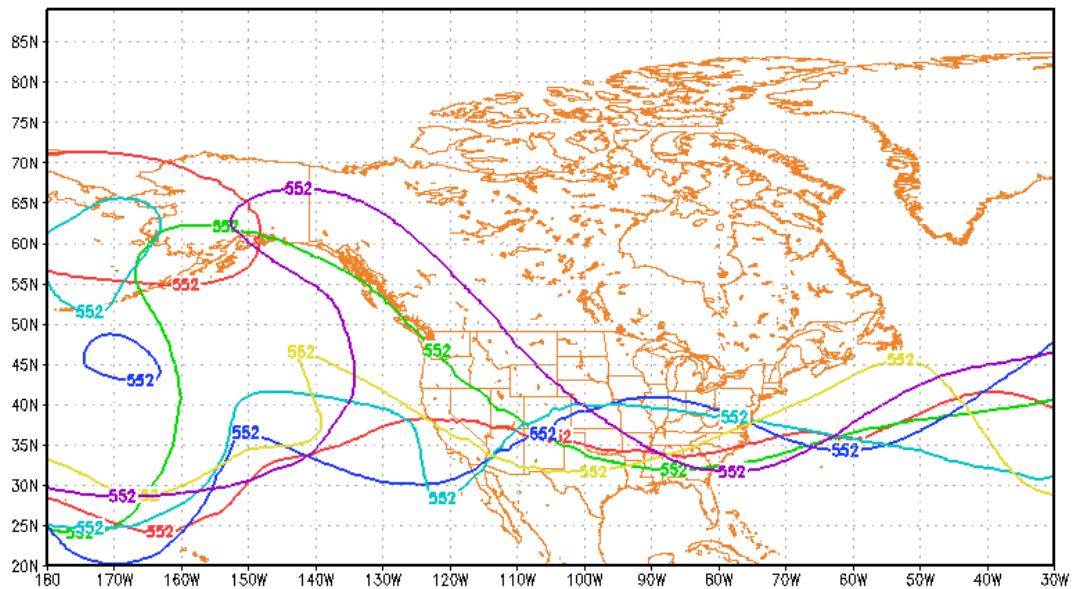
Η δεύτερη LAF αποτελείται από τις προσομοιώσεις με αρχικές συνθήκες 01-05 Ιανουαρίου 2014. Η πορεία που ακολουθήθηκε είναι η ίδια με την πρώτη LAF. Δημιουργώντας διαφορετικά σύνολα προσομοιώσεων τα οποία έχουν αρχικές συνθήκες όλο και πιο πίσω χρονικά, αυτό που θέλουμε να παρατηρήσουμε είναι τη χρονική απόσταση στην οποία μπορούμε να έχουμε μια προσεγγιστικά καλή περιγραφή της κυκλοφορίας που επικράτησε στα τέλη Ιανουαρίου στην Αμερική.

500hPa 552gpm lines 25/01/2014 Init. 1-5/01



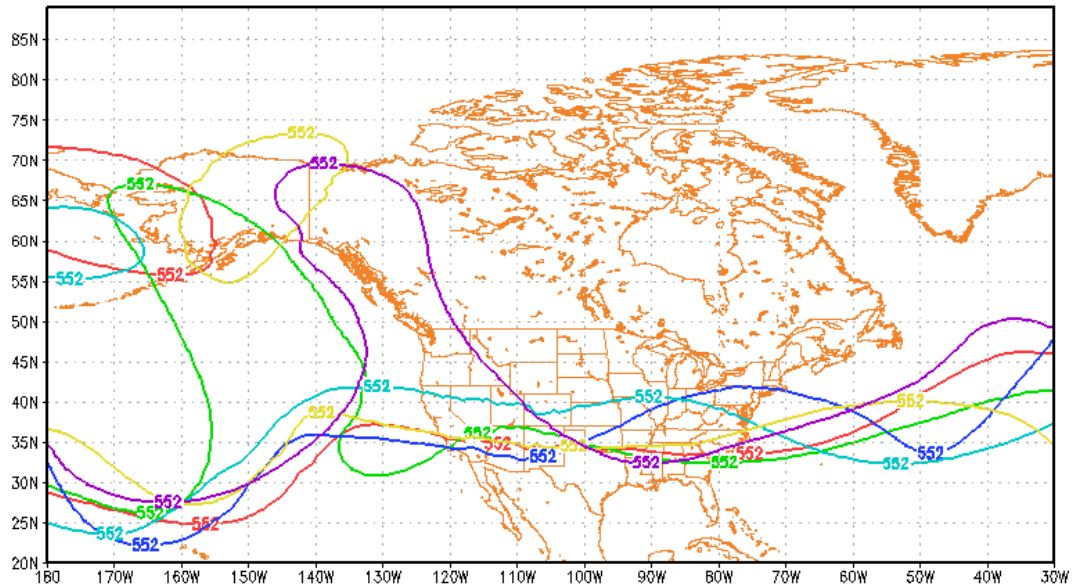
Σχήμα 5.6: Ομοίως με τα Σχήματα 5.1-5.5 αλλά με αρχικοποίηση στις 01-05/01/2014 για τις 25/01/2014

500hPa 552gpm lines 26/01/2014 Init. 1-5/01



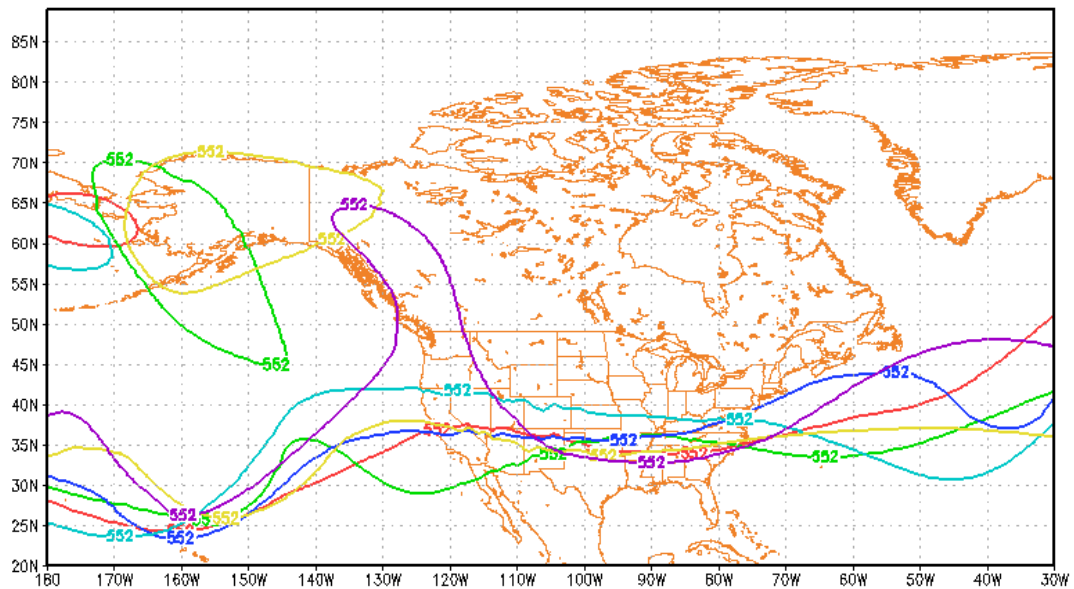
Σχήμα 5.7: Ομοίως με τα Σχήματα 5.1-5.5 αλλά με αρχικοποίηση στις 01-05/01/2014 για τις 26/01/2014

500hPa 552gpm lines 27/01/2014 Init. 1-5/01

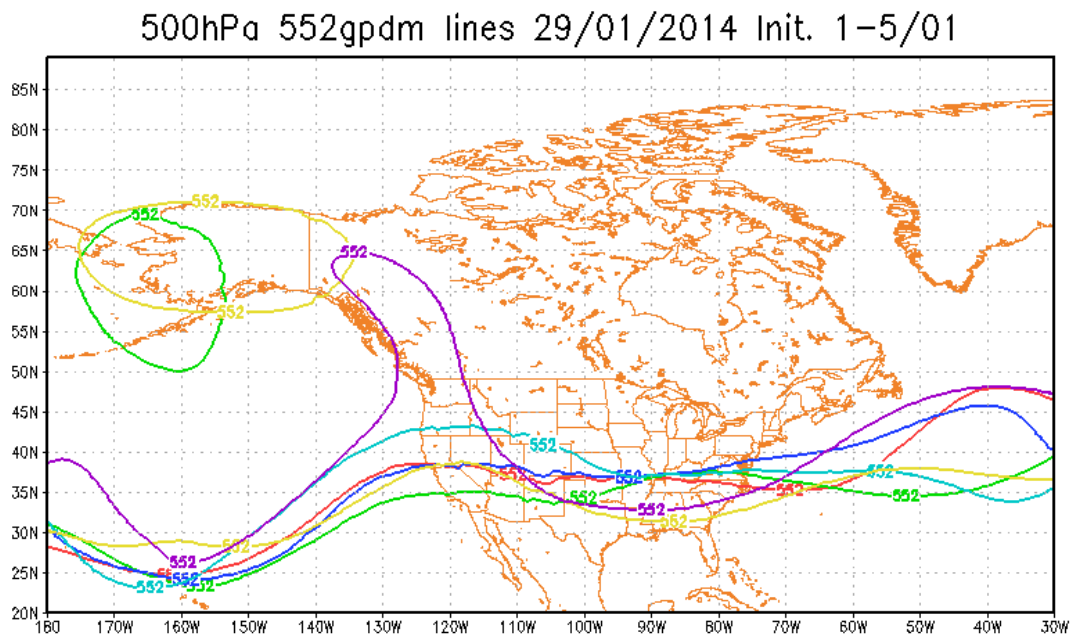


Σχήμα 5.8: Ομοίως με τα Σχήματα 5.1-5.5 αλλά με αρχικοποίηση στις 01-05/01/2014 για τις 27/01/2014

500hPa 552gpm lines 28/01/2014 Init. 1-5/01



Σχήμα 5.9: Ομοίως με τα Σχήματα 5.1-5.5 αλλά με αρχικοποίηση στις 01-05/01/2014 για τις 28/01/2014

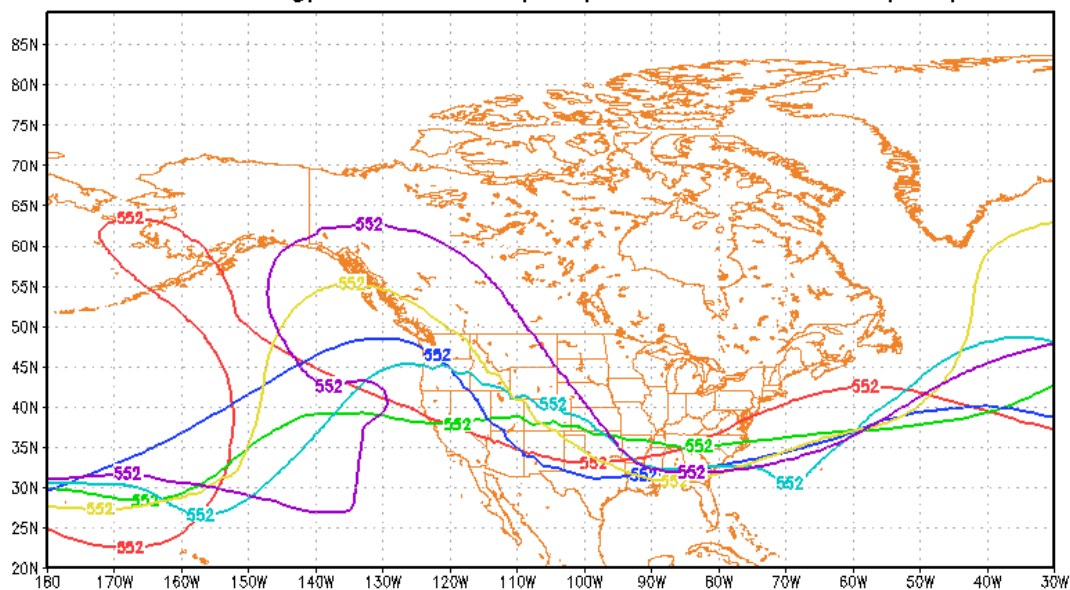


Σχήμα 5.10: Ομοίως με τα Σχήματα 5.1-5.5 αλλά με αρχικοποίηση στις 01-05/01/2014 για τις 29/01/2014

Όπως και στην πρώτη LAF έτσι και εδώ τα χρώματα μωβ ,πράσινο, κόκκινο , μπλε, γαλάζιο και κίτρινο απόδίδονται στην ανάλυση και τις προσομοιώσεις που αρχίζουν 5/1/2014, 4/1/2014, 3/1/2014, 2/1/2014 και 1/1/2014, αντίστοιχα. Στη δεύτερη LAF παρατηρείται πάλι μια ικανοποιητική συμφωνία για τη θέση της ισοϋψούς των 552 από την Κεντρική Αμερική και ανατολικότερα, ενώ μεγαλύτερη διασπορά υπάρχει σχετικά με τη θέση και την ισχύ της ράχης στη δυτική πλευρά της Βορείου Αμερικής. Η μπλε γραμμή η οποία αντιστοιχεί στην προσομοίωση που άρχισε στις 03 Ιανουαρίου του 2014 παρουσιάζει ζωνικότητα στη χωρική κατανομή της και δε διακρίνονται περιοχές με ράχες ή αυλώνες. Οι υπόλοιπες προσομοιώσεις παρουσιάζουν τη ράχη στις Δυτικές ακτές αλλά πιο εξασθενημένη σε σχέση με την πραγματική της ένταση. Αντίστοιχα εξασθενημένος είναι και ο αυλώνας στα Κεντρικά και Ανατολικά τμήματα. Η δεύτερη LAF λοιπόν παρέχει μια εικόνα της γενικής κυκλοφορίας στο τέλος του μήνα αλλά υποδεέστερη σε σχέση με την πρώτη LAF. Κάτι τέτοιο είναι λογικό καθώς η δεύτερη LAF περιέχει προσομοιώσεις που αρχίζουν πέντε μέρες πριν τις αντίστοιχες της πρώτης, και 20-25 μέρες μακριά από την περίοδο ενδιαφέροντος.

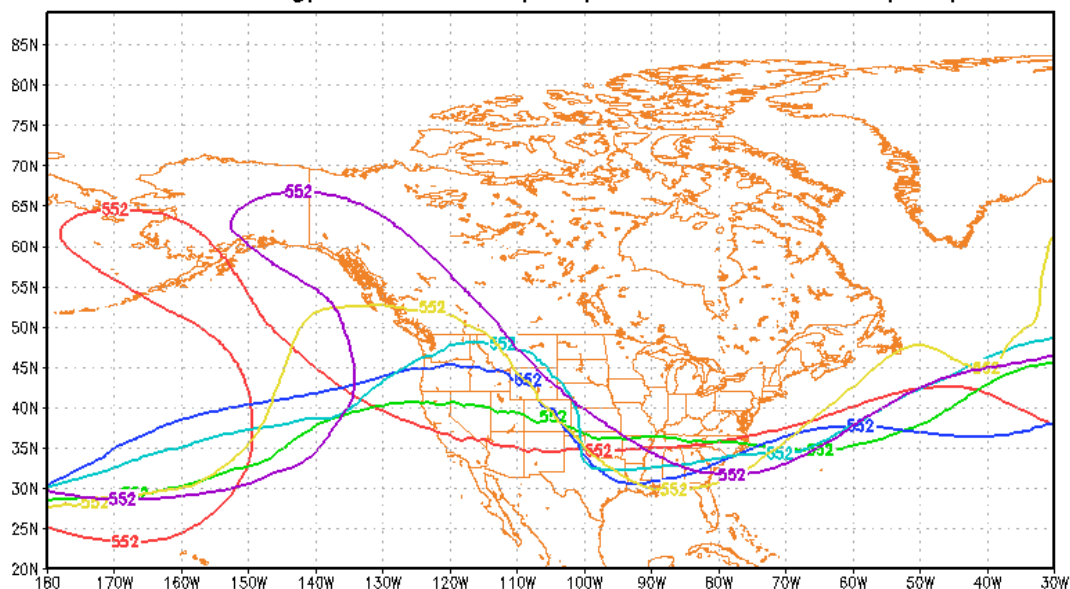
Η Τρίτη LAF αναφέρεται στις προσομοιώσεις που έλαβαν χώρα με αρχικές συνθήκες από τις 27 Δεκεμβρίου του 2013 έως τις 31 Δεκεμβρίου του 2013. Παρακάτω ακολουθούν τα αντίστοιχα spaghetti plots για το σύνολο αυτών των προσομοιώσεων.

500hPa 552gpdm lines 25/01/2014 Init. 27-31/12/13



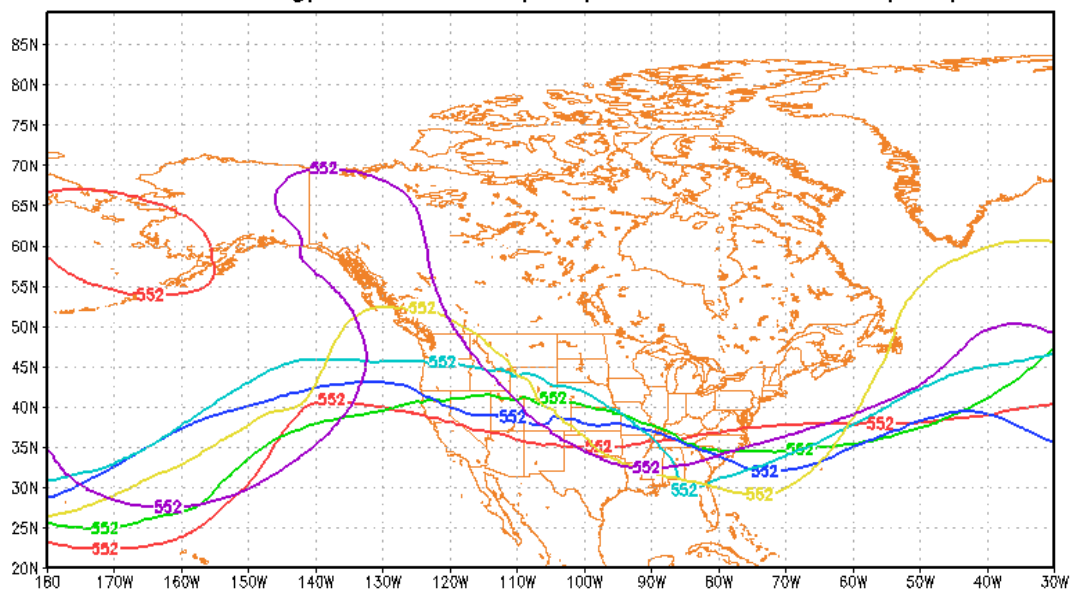
Σχήμα 5.11: Ομοίως με τα Σχήματα 5.1-5.5 με αρχικοποίηση στις 27-31/12/2013 για τις 25/01/2014

500hPa 552gpdm lines 26/01/2014 Init. 27-31/12/13



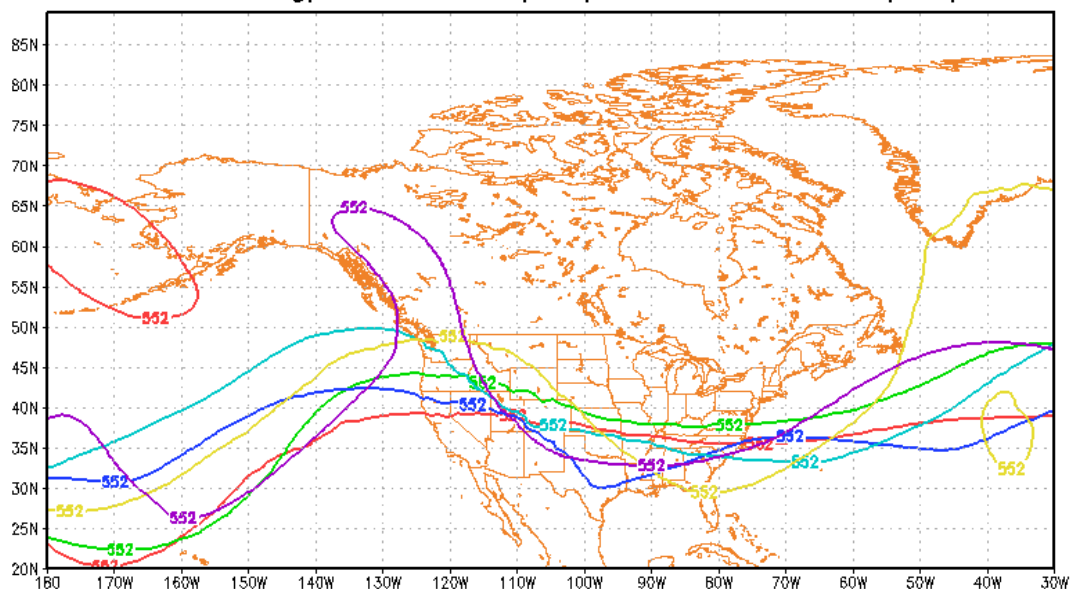
Σχήμα 5.12: : Ομοίως με τα Σχήματα 5.1-5.5 με αρχικοποίηση στις 27-31/12/2013 για τις 26/01/2014

500hPa 552gpdm lines 27/01/2014 Init. 27-31/12/13

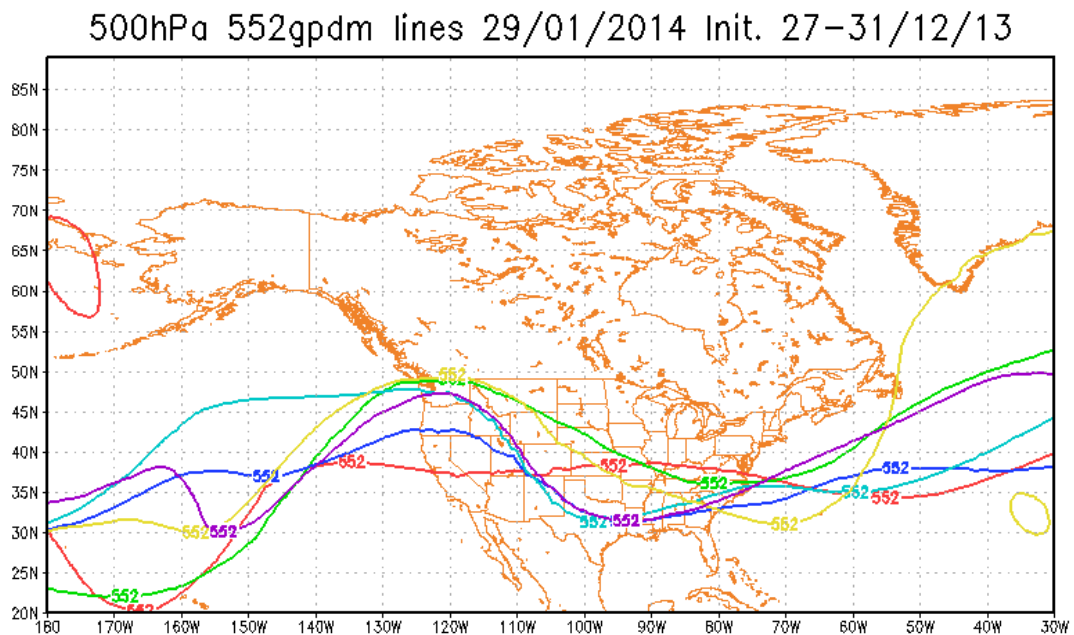


Σχήμα 5.13: : Ομοίως με τα Σχήματα 5.1-5.5 με αρχικοποίηση στις 27-31/12/2013 για τις 27/01/2014

500hPa 552gpdm lines 28/01/2014 Init. 27-31/12/13



Σχήμα 5.14: Χωρική κατανομή της ισοϋψούς 552gpdm στα 500hPa για τα μέλη της τρίτης LAF για τις 28/01/2014

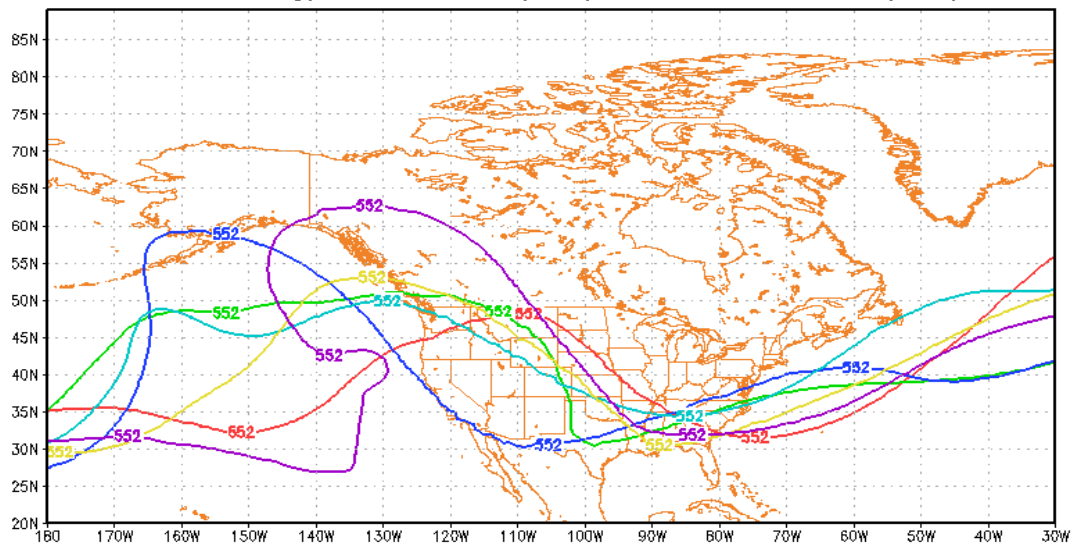


Σχήμα 5.15: : Ομοίως με τα Σχήματα 5.1-5.5 με αρχικοποίηση στις 27-31/12/2013 για τις 29/01/2014

Όπως και στις προηγούμενες δύο LAF στα Κεντρικά τμήματα της Βόρειας Αμερικής και ανατολικότερα δεν υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα στη θέση της ισοϋψούς 552 στην Ανατολική Βόρεια Αμερική. Στη Δυτική Βόρεια Αμερική υπάρχει η αντικυκλωνική κυκλοφορία από όλα τα μέλη με εμφάνιση της ράχης στις Δυτικές ακτές της Αμερικής πιο εξασθενημένης σε σχέση με τις αναλύσεις.

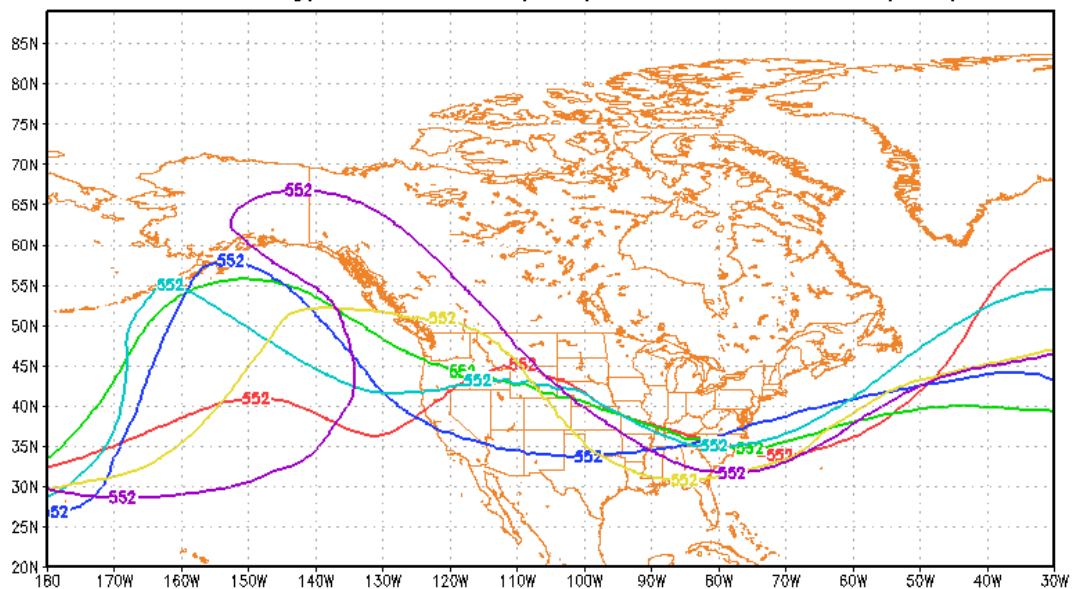
Τέλος η τέταρτη LAF περιέχει πέντε προσομοιώσεις με αρχικές συνθήκες από 22 έως 26 Δεκεμβρίου 2013. Δηλαδή ένα μήνα πριν την περίοδο ενδιαφέροντος.

500hPa 552gpm lines 25/01/2014 Init. 21-25/12/13



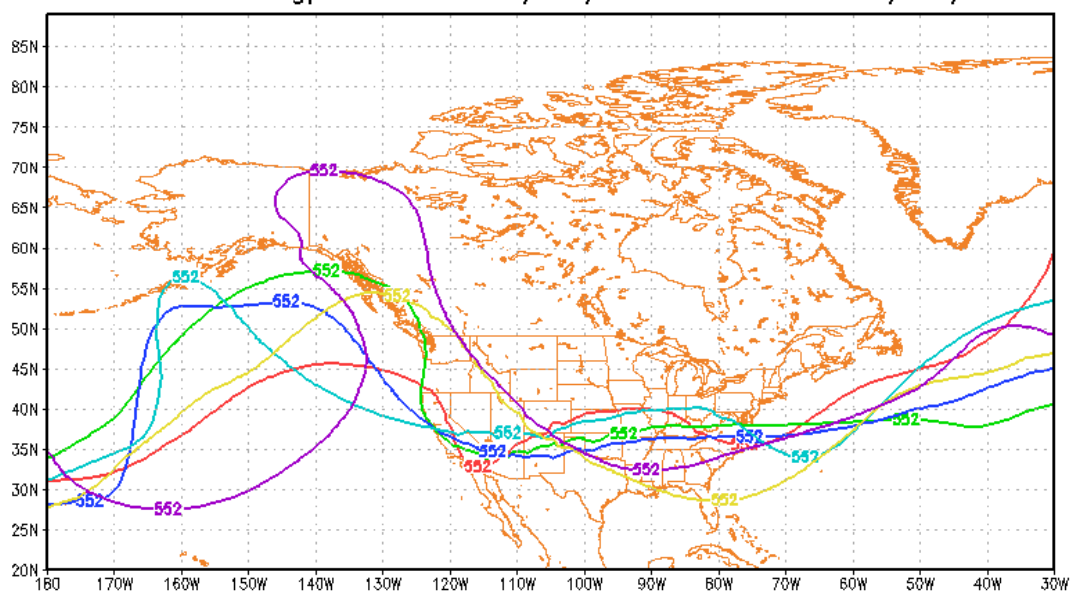
Σχήμα 5.16: : Ομοίως με τα Σχήματα 5.1-5.5 με αρχικοποίηση στις 22-26/12/2013 για τις 25/01/2014

500hPa 552gpm lines 26/01/2014 Init. 21-25/12/13



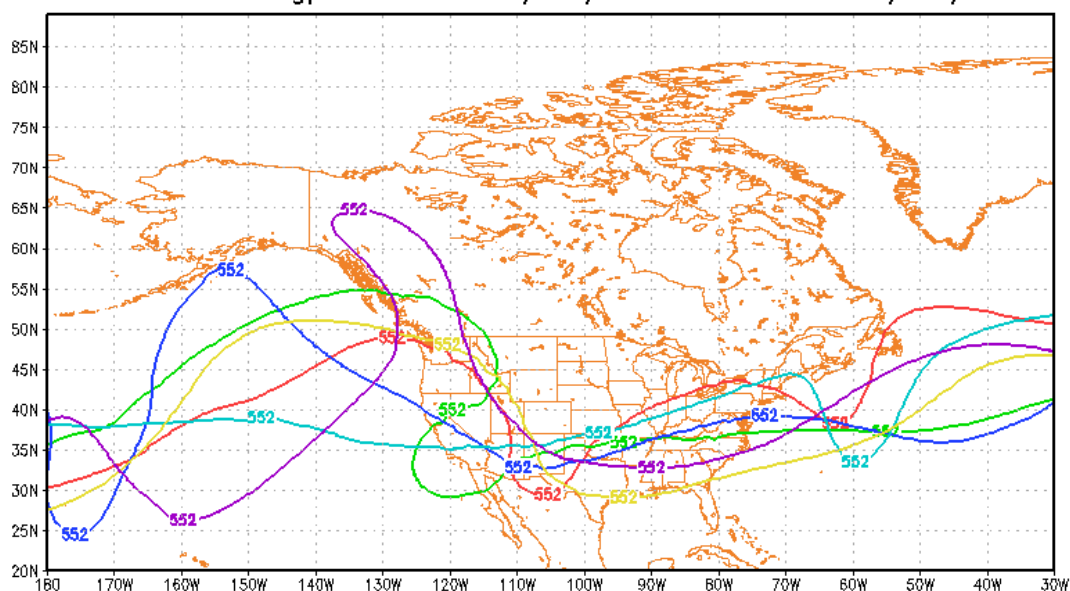
Σχήμα 5.17: Ομοίως με τα Σχήματα 5.1-5.5 με αρχικοποίηση στις 22-26/12/2013 για τις 26/01/2014

500hPa 552gpdm lines 27/01/2014 Init. 21-25/12/13

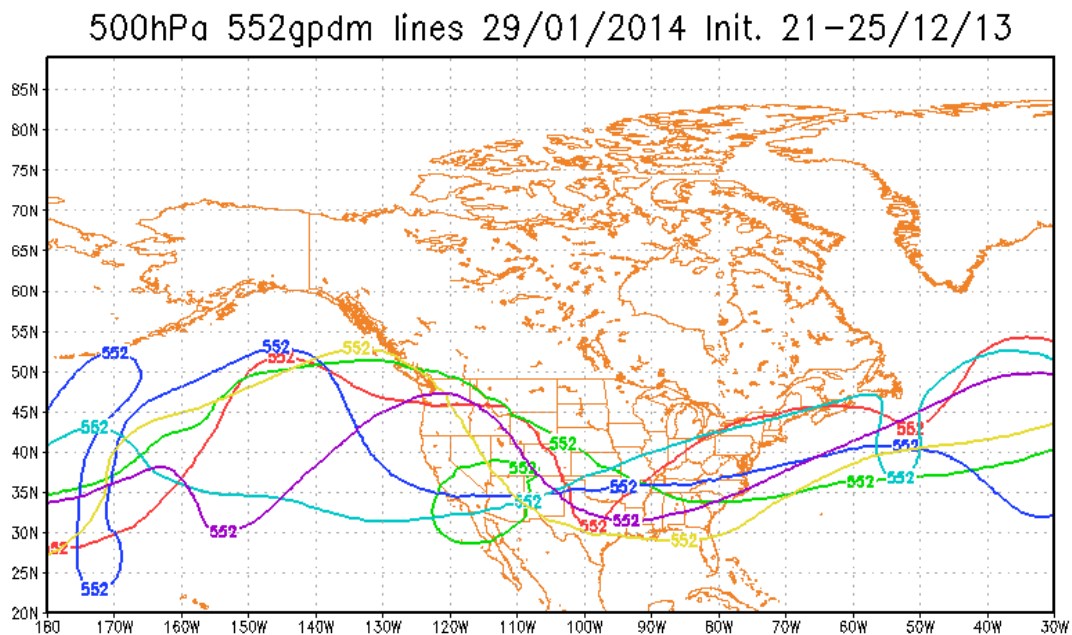


Σχήμα 5.18: Ομοίως με τα Σχήματα 5.1-5.5 με αρχικοποίηση στις 22-26/12/2013 για τις 27/01/2014

500hPa 552gpdm lines 28/01/2014 Init. 21-25/12/13



Σχήμα 5.19: Ομοίως με τα Σχήματα 5.1-5.5 με αρχικοποίηση στις 22-26/12/2013 για τις 28/01/2014



Σχήμα 5.20: Ομοίως με τα Σχήματα 5.1-5.5 με αρχικοποίηση στις 22-26/12/2013 για τις 29/01/2014

Στα μέλη της τέταρτης LAF παρουσιάζονται αρκετά μεγάλες αβεβαιότητες σχετικά με την ισοϋψή των 552 για τις 28 και 29 του Ιανουαρίου. Σε αυτές τις ημερομηνίες παρατηρείται αβεβαιότητα σε όλο το εύρος της περιοχής ενδιαφέροντος και έτσι δεν υπάρχει αξιοπιστία στην περιγραφή της κυκλοφορίας για το τέλος του Ιανουαρίου. Στον αντίποδα οι προσομοιώσεις για τις 25 ,26 και 27 του μήνα παρουσιάζουν τη ράχη στα δυτικά, με αβεβαιότητα για τη θέση του, καθώς και τον αυλώνα στην Ανατολική Βόρεια Αμερική με μικρές αποκλίσεις.

5.3 Στατιστικά μέτρα που χρησιμοποιήθηκαν

Για τη στατιστική αξιολόγηση των προσομοιώσεων εκτός από τα spaghetti plots υπολογίστηκε το Μέσο Σφάλμα (Bias) καθώς και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root Mean Squared Error, RMSE). Οι σχέσεις που δίνουν αυτά τα δύο στατιστικά μεγέθη είναι:

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)}{N}$$

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

Όπου με M_i συμβολίζονται οι τιμές οι οποίες προέρχονται από την προσομοίωση, ενώ με O_i είναι οι πραγματικές τιμές του εκάστοτε πεδίου. Με το Bias στην ουσία υπολογίζουμε τη μέση απόκλιση των προγνωστικών πεδίων από τις τιμές της ανάλυσης, και βλέπουμε την ύπαρξη υπερεκτίμησης ή υποεκτίμησης των πραγματικών τιμών από το μοντέλο. Το RMSE είναι ένα κριτήριο για τη σύγκριση και αξιολόγηση εκτιμητών. Στην περίπτωση μας ο πληθυσμός είναι τα δεδομένα των αναλύσεων, δηλαδή οι πραγματικές τιμές, ενώ οι εκτιμητές

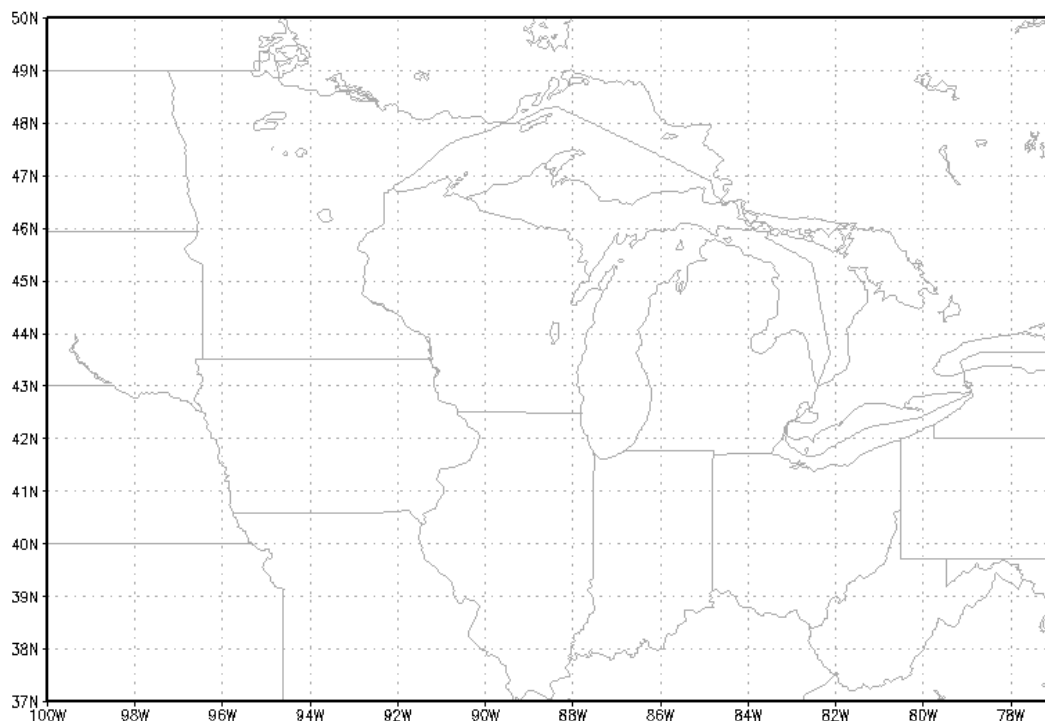
είναι η κάθε ξεχωριστή προσομοίωση του μοντέλου WRF. Σε αριθμητικούς υπολογισμούς θεωρείται προτιμότερο να ανακοινώνεται η τιμή του τυπικού σφάλματος αντί της τιμής του μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Αυτό δικαιολογείται, επειδή το μέσο τετραγωνικό σφάλμα που είναι το τυπικό χωρίς τη ρίζα αξιολογεί τις απόκλίσεις των τιμών του εκτιμητή από τις πραγματικές τιμές, ενώ υπολογίζοντας την τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος δηλαδή το τυπικό σφάλμα προκύπτουν άμεσα συγκρίσιμες τιμές με τον εκτιμητή καθώς και ίδιες μονάδες μέτρησης.

Στην παρούσα εργασία όπως ειπώθηκε και προηγουμένως έλαβαν χώρα αρχικά 20 προσομοιώσεις. Στη συνέχεια χωρίστηκαν σε πεντάδες. Κάθε πεντάδα αντιπροσωπεύει και μια LAF. Στατιστικά υπολογίστηκαν για κάθε LAF και στην συνέχεια για την LAF με την δεύτερη καλύτερη προγνωσιμότητα 10 ξεχωριστές προσομοιώσεις έλαβαν χώρα. Η επιλογή της LAF με την δεύτερη καλύτερη προγνωσιμότητα έγινε γιατί η LAF με την καλύτερη προγνωσιμότητα βρισκόταν αρκετά κοντά στην περίοδο ενδιαφέροντος ενώ οι υπόλοιπες δύο είχαν σημαντικά χειρότερη ικανότητα πρόγνωσης. Οι πρώτες 20 προσομοιώσεις χρησιμοποιούν θερμοκρασίες θάλασσας (SSTs) οι οποίες προέρχονται από τα δεδομένα αναλύσεων. Οι θερμοκρασίες θάλασσας κάθε προσομοίωσης ανανεώνονται κάθε 24 ώρες και οι τιμές τους αντιστοιχούν στις πραγματικές θερμοκρασίες θάλασσας που παρατηρήθηκαν την εκάστοτε ημέρα. Κάτι τέτοιο είναι μη ρεαλιστικό καθώς κάνοντας μια προσομοίωση δεν μπορούμε να γνωρίζουμε τις πραγματικές θερμοκρασίες θάλασσας τις επόμενες ημέρες αλλά αυτή η τεχνική δημιουργεί ένα όριο ανώτατης προγνωστικής ικανότητας συναρτήσει των θερμοκρασιών θάλασσας (ΜΕΘΟΔΟΣ 1). Από τις επόμενες 10 προσομοιώσεις με αρχικοποίηση 1-5 Ιανουαρίου 2014 οι πρώτες πέντε από αυτές (ΜΕΘΟΔΟΣ 2) έχουν θερμοκρασίες θάλασσας οι οποίες δίνονται από τις αρχικές συνθήκες και μόνο μια μικρή μεταβολή της επιφανειακής θερμοκρασίας θάλασσας είναι δυνατή η οποία επιτυγχάνεται μέσω εσωτερικών διαδικασιών και παραμετροποιήσεων του μοντέλου την ώρα της προσομοίωσης. Τέλος οι τελευταίες πέντε προσομοιώσεις (ΜΕΘΟΔΟΣ 3) βασίζονται σε μια μίξη κλιματικών θερμοκρασιών θάλασσας για τα τελευταία 30 χρόνια και ανωμαλιών της περιόδου αναφοράς σε σχέση με τις κλιματικές τιμές. Πιο αναλυτικά αυτό που έγινε αρχικά ήταν να υπολογισθούν οι μέσες κλιματικές θερμοκρασίες θαλασσών για κάθε ημέρα του Ιανουαρίου τα προηγούμενα 30 έτη πριν το 2014. Στην συνέχεια υπολογίστηκε η μέση θερμοκρασία των θαλασσών τις τελευταίες 14 ημέρες του Δεκεμβρίου του 2013 και αφαιρέθηκε από τις αντίστοιχες κλιματικές τιμές. Η τιμή της ανωμαλίας που παράχθηκε προστέθηκε στην κλιματική τιμή θερμοκρασιών θάλασσας για κάθε μέρα του Ιανουαρίου του 2014 και στην συνέχεια οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία 5 προσομοιώσεων με αρχικοποίηση 1-5 Ιανουαρίου 2014. Σύγκριση των ανωτέρω μεταξύ τους έλαβε χώρα έτσι ώστε να ελεγχθεί η ευαισθησία των προσομοιώσεων στην μεταβολή των θερμοκρασιών θάλασσας.

5.4 Περιοχή υπολογισμού των στατιστικών

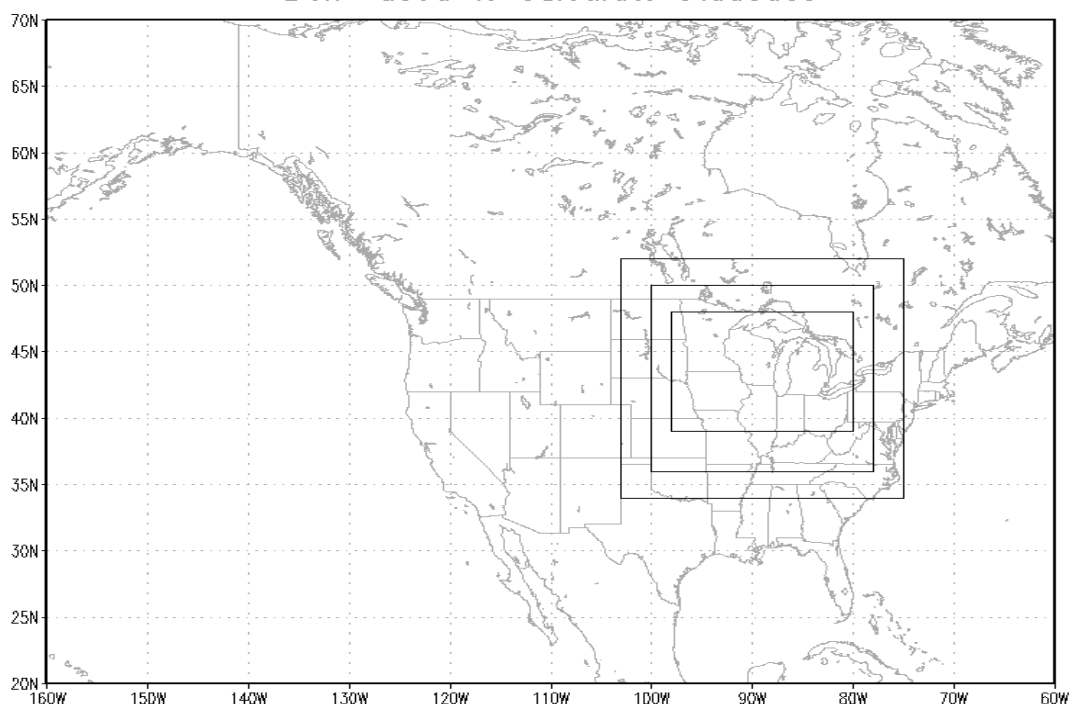
Τα στατιστικά υπολογίστηκαν για δύο διαφορετικά μετεωρολογικά πεδία, το πεδίο του γεωδυναμικού στα 500 hPa πάνω από τη Βόρεια Αμερική καθώς και το πεδίο της θερμοκρασίας στα 850 hPa. Ο υπολογισμός των στατιστικών έγινε για μια περιοχή της Κεντρικής και Ανατολικής Βόρειας Αμερικής (περιοχή ενδιαφέροντος). Η συγκεκριμένη περιοχή έχει διαστάσεις από 37°B έως 50°B και από 260°A έως 283°A (Σχήμα 5.21). Για να απόδειχθεί η ανεξαρτησία των τιμών των στατιστικών στην περιοχή επιλογής όλα τα

στατιστικά που ακολουθούν υπολογίσθηκαν και για ένα κουτί μικρότερο από το κουτί αναφοράς καθώς και για ένα κουτί μεγαλύτερο από το κουτί αναφοράς (Εικόνα 5.22). Το κουτί αναφοράς, που στο σχήμα αντιστοιχεί στο κουτί με την μεσαία διάσταση, περιέχει 500 πλεγμιακά σημεία ενώ το μικρότερο κουτί (Κουτί 1) περιέχει τα μισά (250), και το μεγαλύτερο (Κουτί 2) περιέχει τα διπλάσια του κουτιού αναφοράς, δηλαδή 1000. Η σχετική προγνωσιμότητα μεταξύ των διαφορετικών LAF παρέμεινε η ίδια ανεξαρτήτως κουτιού. Πιο αναλυτικά για το κουτί αναφοράς (μεσαίο κουτί) η LAF1 παρουσίασε καλύτερη προγνωστική ικανότητα για την περίοδο ενδιαφέροντος (25-29 Ιανουαρίου) από την LAF2 αυτή με την σειρά της με την LAF3 και η τελευταία με την σειρά της με την LAF4. Παράγοντας τα ίδια στατιστικά για τα δύο διαφορετικά κουτιά τα παραπάνω παρέμειναν αμετάβλητα. Δηλαδή ξανά η LAF1 παρουσίαζε την καλύτερη προγνωστική ικανότητα, η LAF2 την δεύτερη καλύτερη κλπ.



Σχήμα 5.21: Περιοχή της Βορείου Αμερικής για την οποία υπολογίσθηκαν τα στατιστικά.

Box used to calculate statistics



Σχήμα 5.22: Διαφορετικές περιοχές για τις οποίες υπολογίστηκαν στατιστικά έτσι ώστε να δείχθει η ανεξαρτησία των στατιστικών στην επιλογή της περιοχής. Το ενδιάμεσο κουτί είναι το 'κουτί αναφοράς', το μικρό είναι το 'Κουτί 1' ενώ το μεγαλύτερο το 'Κουτί 2'.

5.5 Στατιστική ανάλυση πρώτων 20 προσομοιώσεων (ΜΕΘΟΔΟΣ 1)

Για κάθε μία από τις ημέρες ενδιαφέροντος, δηλαδή 25-29 Ιανουαρίου του 2014 υπολογίστηκε η μέση τιμή του γεωδυναμικού ύψους στα 500hPa των πλεγματικών σημείων που περιέχονται μέσα στην περιοχή αναφοράς. Αυτό έγινε και για τα δεδομένα των αναλύσεων και για κάθε ξεχωριστή προσομοίωση. Στη συνέχεια για κάθε LAF (δηλαδή για κάθε πεντάδα προσομοιώσεων) υπολογίστηκαν για κάθε ημέρα ο μέσος όρος γεωδυναμικού κάθε πεντάδας προσομοιώσεων και τα αποτελέσματα αυτά συγκρίθηκαν με τα δεδομένα των αναλύσεων. Παρακάτω ακολουθούν οι πίνακες με τα δεδομένα για κάθε μια LAF για τις πρώτες 20 προσομοιώσεις στις οποίες οι θερμοκρασίες θαλασσών ανανεώνονται κάθε 24 ώρες και αντιστοιχούν στις τιμές των αναλύσεων, δηλαδή των πραγματικών τιμών.

Πίνακας 5.2: Τιμές γεωδυναμικού ύψους για κάθε ξεχωριστή προσομοίωση με πραγματικές επιφανειακές θερμοκρασίες θάλασσας με αρχικοποίηση από τις 06 έως τις 10 Ιανουαρίου. Οι τιμές αναπαριστούν την μέση τιμή γεωδυναμικού ύψους της περιοχής από 37°B έως 50°B και 260°A έως 283°A. Η προτελευταία στήλη αναπαριστά τον μέσο όρο κάθε πεντάδας για την εκάστοτε ημέρα και η τελευταία στήλη τις τιμές των αναλύσεων για τις ημερομηνίες αυτές.

Ημερομ.	Αρχικοπ. 10/01/2014	Αρχικοπ. 09/01/2014	Αρχικοπ. 08/01/2014	Αρχικοπ. 07/01/2014	Αρχικοπ. 06/01/2014	Μέσος όρος	Δεδομένα αναλύσεων
---------	------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	---------------	-----------------------

25/1/2014	512,511	513,218	519,586	526,465	507,161	515,78	522,238
26/1/2014	511,707	510,328	504,457	520,744	507,449	510,93	513,524
27/1/2014	502,368	511,945	503,49	510,318	511,609	507,94	510,554
28/1/2014	507,436	511,918	506,112	516,626	512,945	511,00	510,225
29/1/2014	512,954	517,889	497,69	524,554	512,962	513,20	514,07

Πίνακας 5.3: Τιμές γεωδυναμικού ύψους για κάθε ξεχωριστή προσομοίωση με πραγματικές επιφανειακές θερμοκρασίες θάλασσας με αρχικοποίηση από τις 01 έως τις 05 Ιανουαρίου. Οι τιμές αναπαριστούν την μέση τιμή γεωδυναμικού ύψους της περιοχής από 37°B έως 50°B και 260°A έως 283°A. Η προτελευταία στήλη αναπαριστά τον μέσο όρο κάθε πεντάδας για την εκάστοτε ημέρα και η τελευταία στήλη τις τιμές των αναλύσεων για τις ημερομηνίες αυτές.

Ημερομ.	Αρχικοπ. 05/01/2014	Αρχικοπ. 04/01/2014	Αρχικοπ. 03/01/2014	Αρχικοπ. 02/01/2014	Αρχικοπ. 01/01/2014	Μέσος όρος	Δεδομένα αναλύσεων
25/1/2014	520,631	509,175	522,063	531,39	510,699	518,7916	522,238
26/1/2014	506,79	500,585	540,327	532,718	505,062	517,0964	513,524
27/1/2014	506,463	502,074	537,378	540,707	503,55	518,0344	510,554
28/1/2014	509,051	520,16	523,709	529,258	507,887	518,013	510,225
29/1/2014	521,821	531,601	521,864	530,556	491,167	519,4018	514,07

Πίνακας 5.4: Τιμές γεωδυναμικού ύψους για κάθε ξεχωριστή προσομοίωση με πραγματικές επιφανειακές θερμοκρασίες θάλασσας με αρχικοποίηση από τις 27 έως τις 31 Δεκεμβρίου. Οι τιμές αναπαριστούν την μέση τιμή γεωδυναμικού ύψους της περιοχής από 37°B έως 50°B και 260°A έως 283°A. Η προτελευταία στήλη αναπαριστά τον μέσο όρο κάθε πεντάδας για την εκάστοτε ημέρα και η τελευταία στήλη τις τιμές των αναλύσεων για τις ημερομηνίες αυτές.

Ημερομ.	Αρχικοπ. 31/12/2013	Αρχικοπ. 30/12/2013	Αρχικοπ. 29/12/2013	Αρχικοπ. 28/12/2013	Αρχικοπ. 27/01/2013	Μέσος όρος	Δεδομένα αναλύσεων
25/1/2014	509,831	516,019	511,517	525,553	503,04	513,192	522,238
26/1/2014	512,559	528,571	513,154	527,494	504,537	517,263	513,524
27/1/2014	515,176	527,678	526,944	530,734	511,487	522,4038	510,554
28/1/2014	514,472	528,402	521,782	528,245	515,656	521,7114	510,225
29/1/2014	527,142	523,524	518,874	520,308	530,476	524,0648	514,07

Πίνακας 5.5: Τιμές γεωδυναμικού ύψους για κάθε ξεχωριστή προσομοίωση με πραγματικές επιφανειακές θερμοκρασίες θάλασσας με αρχικοποίηση από τις 22 έως τις 26 Δεκεμβρίου. Οι τιμές αναπαριστούν την μέση τιμή γεωδυναμικού ύψους της περιοχής από 37°B έως 50°B και 260°A έως 283°A. Η προτελευταία στήλη αναπαριστά τον μέσο όρο κάθε πεντάδας για την εκάστοτε ημέρα και η τελευταία στήλη τις τιμές των αναλύσεων για τις ημερομηνίες αυτές.

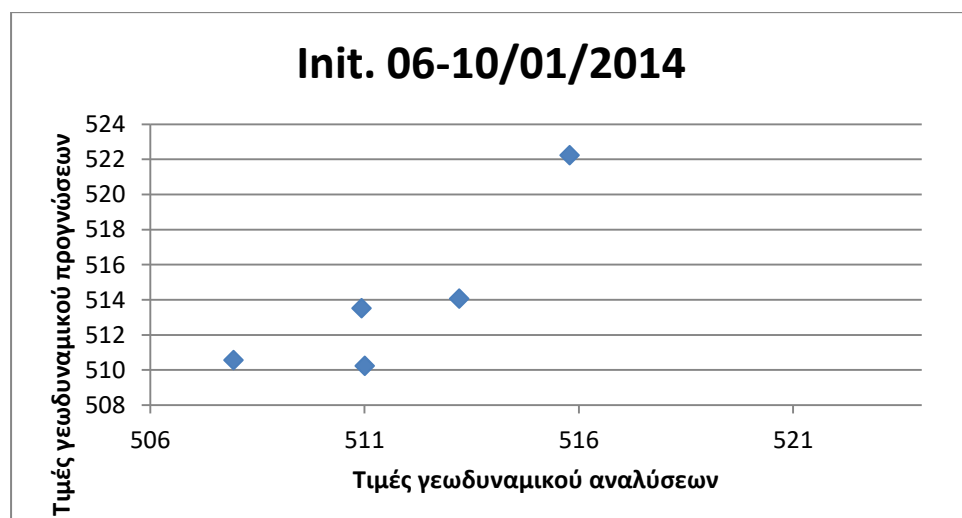
Ημερομ.	Αρχικοπ. 26/01/2013	Αρχικοπ. 25/01/2013	Αρχικοπ. 24/12/2013	Αρχικοπ. 23/12/2013	Αρχικοπ. 22/12/2013	Μέσος όρος	Δεδομένα αναλύσεων
25/1/2014	529,019	526,199	507,315	516,795	522,503	520,3662	522,238
26/1/2014	534,204	525,7	504,888	526,139	514,951	521,1764	513,524
27/1/2014	539,122	531,008	520,23	541,052	512,405	528,7634	510,554
28/1/2014	543,686	530,524	519,317	533,45	510,454	527,4862	510,225
29/1/2014	540,243	526,362	517,674	537,584	509,025	526,1776	514,07

Κάθε πίνακας αντιπροσωπεύει μια LAF. Στην πρώτη στήλη των πινάκων βρίσκονται οι ημερομηνίες ενδιαφέροντος δηλαδή 25 με 29 Ιανουαρίου 2014. Οι επόμενες πέντε στήλες αντιπροσωπεύουν κάθε μία από τις πέντε προσομοιώσεις κάθε LAF. Οι τιμές γεωδυναμικού ύψους αντιπροσωπεύουν τη μέση τιμή του σε όλη περιοχή αναφοράς. Στην προτελευταία στήλη υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι κάθε πεντάδας προσομοιώσεων για την εκάστοτε ημέρα. Η τελευταία στήλη αναπαριστά τις τιμές του γεωδυναμικού από τα δεδομένα των αναλύσεων. Μετά το πέρας των ανωτέρω υπολογισμών για κάθε μία LAF υπολογίστηκαν το BIAS και το RMSE από τις τιμές των παρατηρήσεων και τις μέσες τιμές των πέντε προσομοιώσεων της κάθε ξεχωριστής LAF.

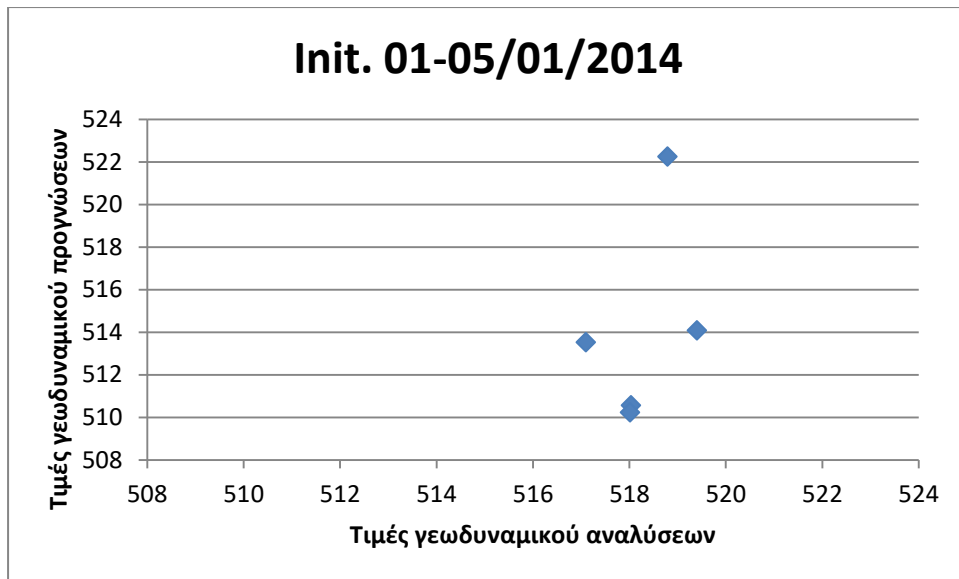
Πίνακας 5.5: Τιμές του BIAS (gpdm) και RMSE (gpdm) για κάθε LAF

Ημερομηνία	BIAS	RMSE
LAF1	-2,34452	3,359948
LAF2	4,14524	5,825412
LAF3	5,6048	9,675344
LAF4	10,67176	12,94749

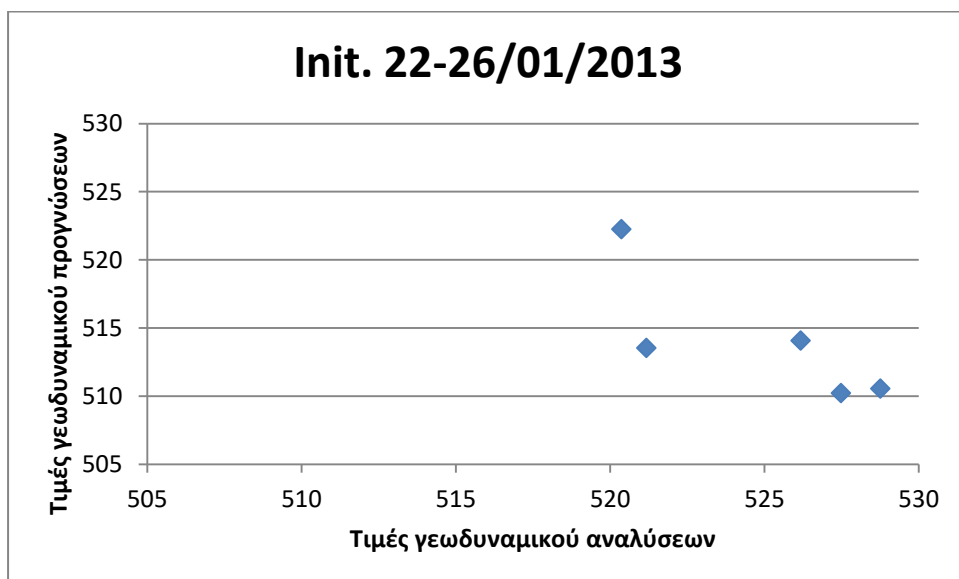
Η LAF1 είναι χρονικά πιο κοντά στις ημερομηνίες ενδιαφέροντος, ενώ η LAF4 είναι αυτή με το μεγαλύτερο προγνωστικό ορίζοντα. Παρατηρείται ότι για την περιοχή αναφοράς η απόκλιση των χωροχρονικά μέσων τιμών των προσομοιώσεων από τις αντίστοιχες τιμές των αναλύσεων είναι αρκετά μικρές της τάξης των δύο με πέντε gpdm. Από τη στιγμή που εξετάζουμε το γεωδυναμικό ύψος στα 500hPa και οι τιμές αυτού είναι της τάξης μεγέθους των 500 gpdm μιλάμε για απόκλίσεις μόνο της τάξης του 0.004% σε σχέση με την πραγματική τιμή. Η μεγαλύτερη απόκλιση εντοπίζεται στη LAF4 ,η οποία περιλαμβάνει προσομοιώσεις ένα μήνα πριν την περίοδο ενδιαφέροντος. Όσον αφορά το RMSE παρατηρείται αύξηση του σε κάθε μία LAF. Κάτι τέτοιο είναι λογικό καθώς κάθε επόμενη LAF απέχει περισσότερο χρονικά από την περίοδο ενδιαφέροντος. Τέλος δημιουργήθηκαν διάγραμμα διασποράς για κάθε μία από τις τέσσερις LAF.



Σχήμα 5.23: Διάγραμμα διασποράς για την LAF1. Ο άξονας των x αναπαριστά τις τιμές γεωδυναμικού των αναλύσεων ενώ ο άξονας των y τις τιμές γεωδυναμικού των προσομοιώσεων . Κάθε ξεχωριστό σημείο του διαγράμματος αντιστοιχεί σε διαφορετική προγνωστική ημέρα. Το διάστημα ενδιαφέροντος ήταν 25-29 Ιανουαρίου οπότε έχουμε 5 σημεία σε κάθε διάγραμμα. Οι τιμές γεωδυναμικού των προγνώσεων είναι μεσοποιημένες μεταξύ των διαφορετικών προσομοιώσεων κάθε LAF



Σχήμα 5.24: Ομοίως με το Σχήμα 5.23 για την LAF2



Σχήμα 5.25: Ομοίως με το Σχήμα 5.23 για την LAF4

Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθήθηκε για τη θερμοκρασία στα 850hPa. Αρχικά ακολουθούν οι πίνακες με τις μέσες τιμές θερμοκρασίας στην περιοχή αναφοράς για κάθε μία LAF

Πίνακας 5.6: Τιμές Θερμοκρασίας (°C) στα 850hPa για κάθε ξεχωριστή προσομοίωση με αρχικοποίηση από τις 06 έως τις 10 Ιανουαρίου. Οι τιμές αναπαριστούν το μέσο όρο θερμοκρασίας στα 850hPa της περιοχής από 37 έως 50 βόρειο και 260 έως 283 Δυτικά. Η προτελευταία στήλη αναπαριστά το μέσο όρο κάθε πεντάδας για την εκάστοτε ημέρα και η τελευταία στήλη τις τιμές των αναλύσεων για τις ημερομηνίες αυτές.

Ημερομ.	Αρχικοπ. 10/01/2014	Αρχικοπ. 09/01/2014	Αρχικοπ. 08/01/2014	Αρχικοπ. 07/01/2014	Αρχικοπ. 06/01/2014	Μέσος όρος	Δεδομένα αναλύσεων
25/1/2014	-14,22	-10,16	-10,16	-9,3	-18,01	-12,37	-9,13
26/1/2014	-18,91	-15,86	-15,86	-10,79	-20,09	-16,302	-15,171
27/1/2014	-25,48	-20,68	-20,68	-18,89	-20,87	-21,32	-14,23
28/1/2014	-22,09	-22,02	-22,02	-14,98	-22,41	-20,704	-23,31
29/1/2014	-16,04	-16,03	-16,03	-3,37	-21,67	-14,628	-20,03

Πίνακας 5.7: Τιμές Θερμοκρασίας (°C) στα 850hPa για κάθε ξεχωριστή προσομοίωση με αρχικοποίηση από τις 01 έως τις 05 Ιανουαρίου. Οι τιμές αναπαριστούν τον μέσο όρο γεωδυναμικού της περιοχής από 37 έως 50 βόρειο και 260 έως 283 Δυτικά. Η προτελευταία στήλη αναπαριστά το μέσο όρο κάθε πεντάδας για την εκάστοτε ημέρα και η τελευταία στήλη τις τιμές των αναλύσεων για τις ημερομηνίες αυτές.

Date	Run 05/01/2014	Run 04/01/2014	Run 03/01/2014	Run 02/01/2014	Run 01/01/2014	Average	Analysis
25/1/2014	-4,61	-10,84	-7,97	-8,68	-13,03	-9,026	-9,13
26/1/2014	-17,83	-19,93	2,85	-12,74	-23,57	-14,244	-15,171
27/1/2014	-21,21	-26,05	6,82	-5,05	-23,05	-13,708	-14,23
28/1/2014	-16,55	-18,98	-1,78	-2,71	-22,78	-12,56	-23,31
29/1/2014	-13,22	-11,81	9,33	-5,42	-29,23	-10,07	-20,03

Πίνακας 5.8: Τιμές Θερμοκρασίας (°C) στα 850hPa για κάθε ξεχωριστή προσομοίωση με αρχικοποίηση από τις 27 έως τις 31 Δεκεμβρίου. Οι τιμές αναπαριστούν το μέσο όρο γεωδυναμικού της περιοχής από 37 έως 50 βόρειο και 260 έως 283 Δυτικά. Η προτελευταία στήλη αναπαριστά το μέσο όρο κάθε πεντάδας για την εκάστοτε ημέρα και η τελευταία στήλη τις τιμές των αναλύσεων για τις ημερομηνίες αυτές.

Date	Run 31/12/2013	Run 30/12/2013	Run 29/12/2013	Run 28/12/2013	Run 27/12/2013	Average	Analysis
25/1/2014	-19,32	-18,79	-7,19	-14,09	-20,64	-16,006	-9,13
26/1/2014	-19,84	-10,06	-13,9	-15,72	-25,32	-16,968	-15,171
27/1/2014	-17,8	-4,23	-3,75	-9,65	-19,93	-11,072	-14,23
28/1/2014	-18,89	-7,51	-3,24	-6,3	-15,62	-10,312	-23,31
29/1/2014	-10,68	-11,55	-5,71	-12,61	-7,73	-9,656	-20,03

Πίνακας 5.9: Τιμές Θερμοκρασίας (°C) στα 850hPa για κάθε ξεχωριστή προσομοίωση με αρχικοποίηση από τις 27 έως τις 31 Δεκεμβρίου. Οι τιμές αναπαριστούν το μέσο όρο γεωδυναμικού της περιοχής από 37 έως 50 βόρειο και 260 έως 283 Δυτικά. Η προτελευταία στήλη αναπαριστά το μέσο όρο κάθε πεντάδας για την εκάστοτε ημέρα και η τελευταία στήλη τις τιμές των αναλύσεων για τις ημερομηνίες αυτές.

Ημερομ.	Αρχικοπ. 26/12/2013	Αρχικοπ. 25/12/2013	Αρχικοπ. 24/12/2013	Αρχικοπ. 23/12/2013	Αρχικοπ. 22/12/2013	Μέσος όρος	Δεδομένα αναλύσεων
25/1/2014	-10,9886	-6,56	-14,68	-23,25	-9,36	-12,9677	-9,13
26/1/2014	-2,64	-3,71	-26,17	-18,72	-11,23	-12,494	-15,171
27/1/2014	0,63896	-7,11	-21,03	-4,32	-13,09	-8,98221	-14,23
28/1/2014	3,12	-8,22	-14,5	-2,54	-18,09	-8,046	-23,31
29/1/2014	-0,01	-6,17	-16,63	1,03	-18,86	-8,128	-20,03

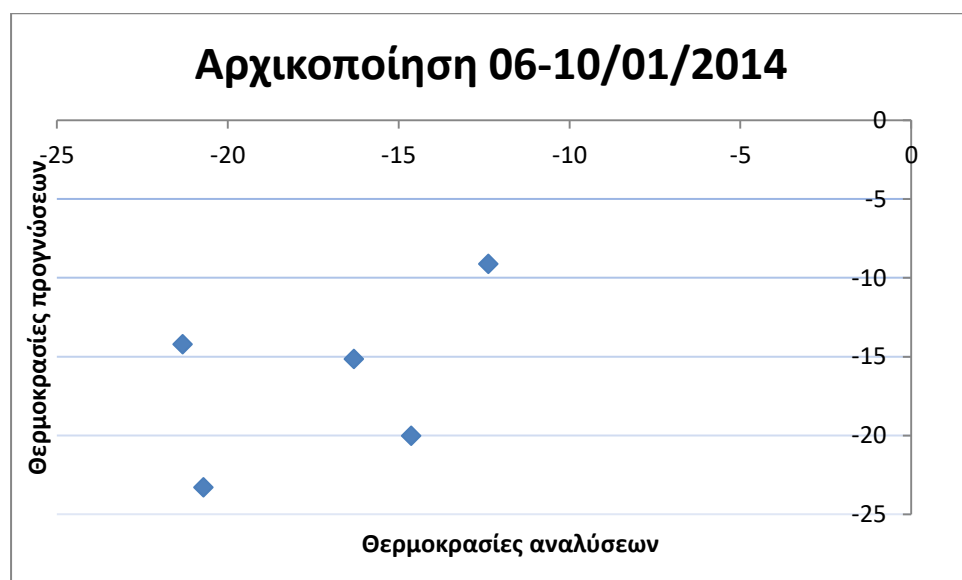
Στην συνέχεια ακολουθεί ο πίνακας με τις τιμές του BIAS και RMSE για κάθε LAF που υπολογίστηκαν με την ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε και για το γεωδυναμικό ύψος.

Πίνακας 5.10: Τιμές του BIAS (°C) και RMSE (°C) για κάθε LAF

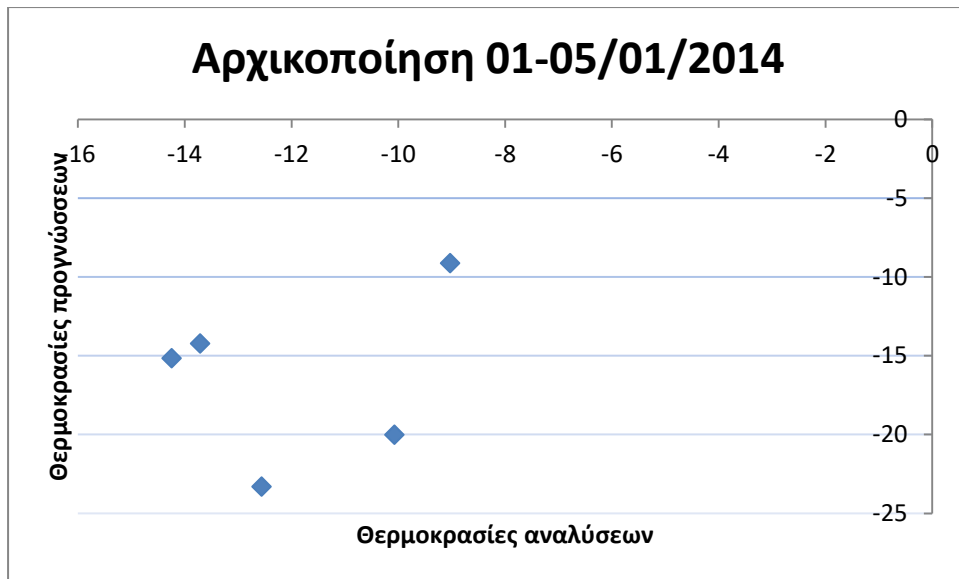
Ημερομ.	BIAS	RMSE
LAF1	-0,69	4,42
LAF2	4,45	6,57
LAF3	3,57	8,21
LAF4	6,25	9,2

Παρατηρείται ότι η απόκλιση της πρώτης LAF είναι πολύ μικρή από την πραγματική θερμοκρασία στα 850hPa. Οι επόμενες δύο έχουν μια θετική απόκλιση της τάξης των τεσσάρων βαθμών, ενώ η τελευταία έχει μια απόκλιση της τάξης των 6.25 βαθμών. Όσον αφορά το RMSE εκτός της πρώτης LAF που παρουσιάζει απόκλιση της τάξης των 4,42 βαθμών, οι απόκλίσεις ανεβαίνουν για κάθε LAF, όσο αυξάνεται η προγνωστική περίοδος. Στις τελευταίες δύο LAF η απόκλιση είναι αρκετά μεγάλη της τάξεως των 8-9 βαθμών. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η πρόγνωση του πεδίου των γεωδυναμικών υψών στα 500hPa είναι αρκετά καλύτερη σε σχέση με την πρόγνωση της θερμοκρασίας στα 850hPa.

Τέλος ακολουθούν τα διαγράμματα διασποράς για κάθε μία από τις τέσσερις LAF.



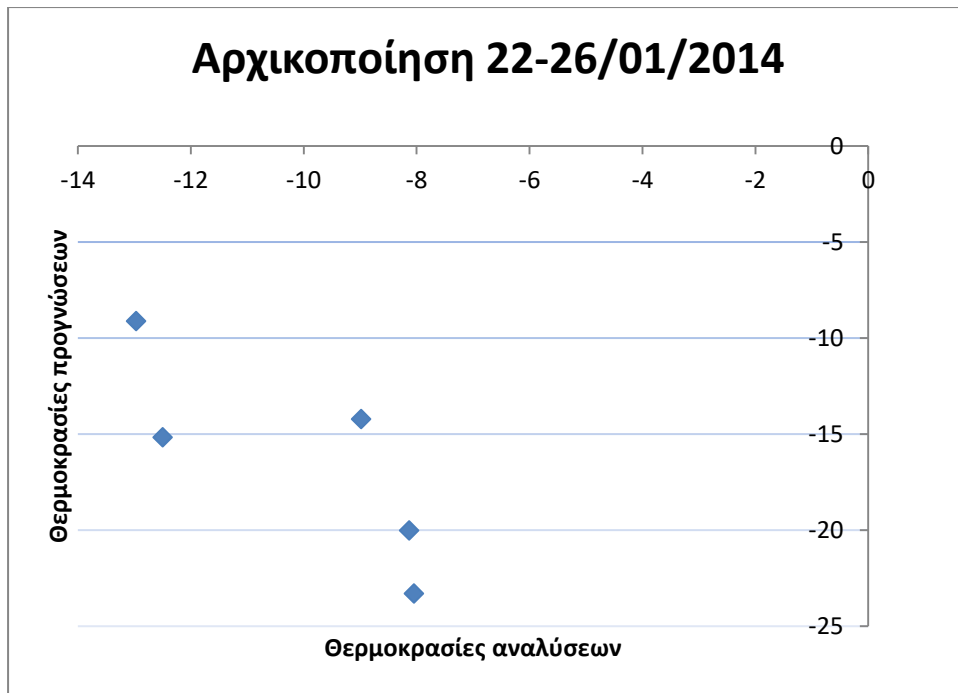
Σχήμα 5.26: Διάγραμμα διασποράς για την LAF1. Ο άξονας των x αναπαριστά τις τιμές Θερμοκρασίας (°C) των αναλύσεων ενώ ο άξονας των y τις τιμές Θερμοκρασίας (°C) των προσομοιώσεων. Κάθε ξεχωριστό σήμειο του διαγράμματος αντιστοιχεί σε διαφορετική προγνωστική ημέρα. Το διάστημα ενδιαφέροντος ήταν 25-29 Ιανουαρίου οπότε έχουμε 5 σημεία σε κάθε διάγραμμα. Οι τιμές θερμοκρασίας των προγνώσεων είναι μεσοποιημένες μεταξύ των διαφορετικών προσομοιώσεων κάθε LAF



Σχήμα 5.27: Ομοίως με το σχήμα 5.67 για την LAF2



Σχήμα 5.28: Ομοίως με το σχήμα 5.27 για την LAF3



Σχήμα 5.29: Ομοίως με το σχήμα 5.27 για την LAF4

Συμπερασματικά παρατηρείται και από τα δύο πεδία ότι η προγνωσιμότητα βελτιώνεται καθώς οι αρχικοποίηση πλησιάζει την περίοδο ενδιαφέροντος. Η LAF1 παρουσιάζει καλύτερες τιμές προγνωσιμότητας σε σχέση με την LAF2 και αυτή με την σειρά της παρομοίως με την LAF3 και LAF4. Η LAF1 είναι σχετικά κοντά στην περίοδο ενδιαφέροντος και έτσι η δεύτερη καλύτερη σε προγνωσιμότητα, δηλαδή η LAF2, επιλέχθηκε για την περαιτέρω έρευνα του γεγονότος και την ευαισθησία αυτού στις θερμοκρασίες θάλασσας.

5.6 Στατιστικά για την Μέθοδο 2 (Θερμοκρασίες θάλασσας που ανανεώνονται μέσω παραμετροποίησης του μοντέλου)

Οι πέντε προσομοιώσεις που ακολούθησαν με αρχικοποίηση 01-05 Ιανουαρίου 2014 έχουν θερμοκρασίες θαλασσών καθόλη την διάρκεια των προσομοιώσεων, οι οποίες δίνονται από τις αρχικές συνθήκες και η μόνη μεταβολή η οποία υπάρχει είναι μια μικρή αλλαγή στην επιφανειακή θερμοκρασία θάλασσας η οποία γίνεται μέσα από διαδικασίες και παραμετροποιήσεις του μοντέλου κατά την διάρκεια των προσομοιώσεων. Η επιφανειακή θερμοκρασία θάλασσας η οποία είναι και η παράμετρος που αλλάζει στο μοντέλο επηρεάζεται από τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στο υπερκείμενο στρώμα αέρα. Μετά το πέρας των προσομοιώσεων στατιστικά παρόμοια με αυτά που υπολογίστηκαν για τις πρώτες 20 προσομοιώσεις έλαβαν χώρα και ακολουθούν παρακάτω.

Πίνακας 4.19: Τιμές γεωδυναμικού ύψους (gpdm) στα 500hPa για κάθε ξεχωριστή προσομοίωση με αρχικοποίηση από τις 01 έως τις 05 Ιανουαρίου. Οι τιμές αναπαριστούν το μέσο όρο γεωδυναμικού της περιοχής από 37 έως 50 βόρειο και 260 έως 283 Δυτικά. Η τελευταία στήλη αναπαριστά το μέσο όρο κάθε πεντάδας για την εκάστοτε ημέρα και η προτελευταία στήλη τις τιμές των αναλύσεων για τις ημερομηνίες αυτές.

Ημερομ.	Αρχικοπ. 05/01	Αρχικοπ. 04/01	Αρχικοπ. 03/01	Αρχικοπ. 02/01	Αρχικοπ. 01/01	Δεδομένα αναλύσεων	Μέσος όρος
25/1/2014	500,36	538,31	534,48	526,85	510,18	515,68	522,036
26/1/2014	512,18	530,15	529,9	519,91	508,3	514,27	520,088
27/1/2014	518,98	531,32	534,5	514,52	503,35	509,11	520,534
28/1/2014	522,87	531,54	531,87	513	510,84	511,8	522,024
29/1/2014	521,38	529,32	531,51	515,83	514,67	517,77	522,542

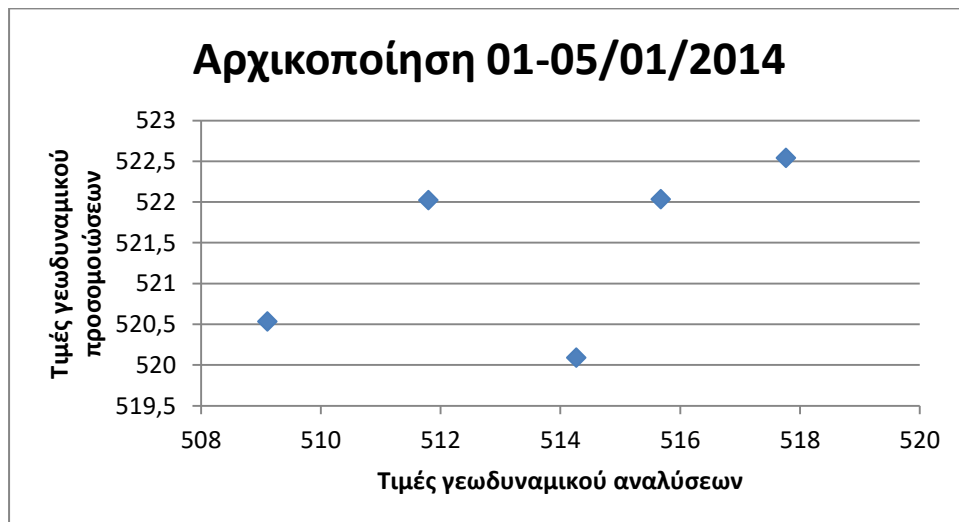
Πίνακας 5.20: Τιμές Θερμοκρασίας (°C) στα 850hPa για κάθε ξεχωριστή προσομοίωση με αρχικοποίηση από τις 01 έως τις 05 Ιανουαρίου. Οι τιμές αναπαριστούν το μέσο όρο θερμοκρασίας της περιοχής από 37 έως 50 βόρειο και 260 έως 283 Δυτικά. Η τελευταία στήλη αναπαριστά το μέσο όρο κάθε πεντάδας για την εκάστοτε ημέρα και η προτελευταία στήλη τις τιμές των αναλύσεων για τις ημερομηνίες αυτές.

Ημερομηνία	Run 05/01	Run 04/01	Run 03/01	Run 02/01	Run 01/01	analysis	average
25/1/2014	-24,36	-7,48	5,34	-7,29	-14,87	-11,87	-9,732
26/1/2014	-22,29	-5,54	-7,54	-11,39	-17,29	-13,38	-12,81
27/1/2014	-17,66	2,15	-5,55	-14,37	-22,9	-19,63	-11,666
28/1/2014	-8,76	1,88	-3,99	-16,09	-23,3	-22,17	-10,052
29/1/2014	-7,76	-1,94	-7,04	-14,38	-19,47	-16,46	-10,118

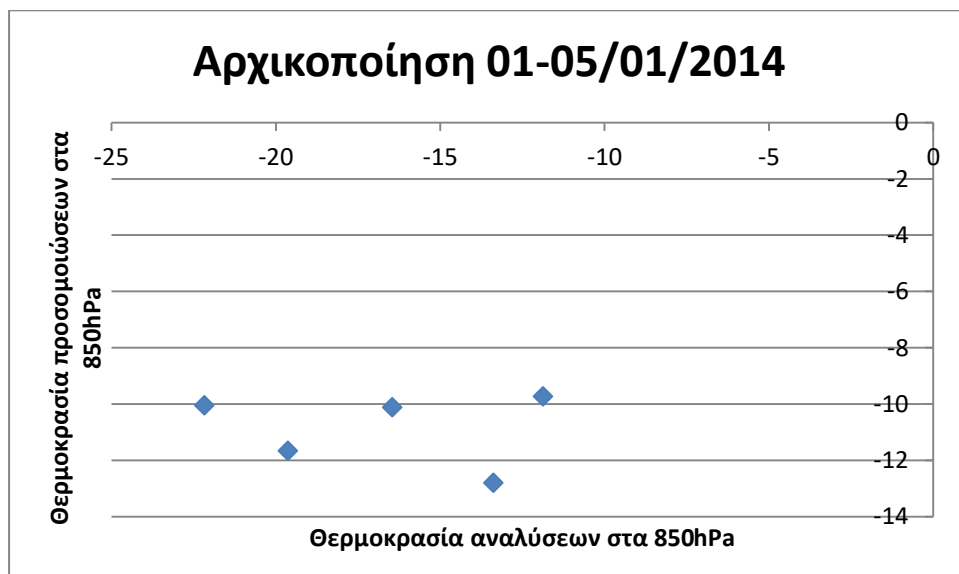
Οι τιμές του bias και του rmse που προκύπτουν για γεωδυναμικό ύψος στα 500hPa και θερμοκρασία στα 850hPa αντίστοιχα είναι:

Πίνακας 5.21: Τιμές bias και rmse για τα πεδία του γεωδυναμικού στα 500hPa και θερμοκρασίας στα 850hPa για τις προσομοιώσεις με αρχικοποίηση 01-05 Ιανουαρίου 2014 και την Μέθοδο 2.

Geopotential Height 500hPa	
Bias	Rmse
7,72	8,15
Temperature 850hPa	
Bias	Rmse
5,82	7,14



Σχήμα 5.30: Ομοίως με το σχήμα 5.27 για την LAF2 και για την μέθοδο 2



Σχήμα 5.31: Ομοίως με το σχήμα 5.27 για την LAF2 και για την ΜΕΘΟΔΟ 2

5.7 Στατιστική ανάλυση για την Μέθοδο 3 (persisted ssts anomalies)

Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθείται και για τις πέντε προσομοιώσεις που χρησιμοποιούν ως θερμοκρασίες θαλασσών τις αποκλίσεις από τις κλιματικές τιμές του αρχικού χρόνου. Τα στατιστικά για τις προσομοιώσεις αυτές ακολουθούν παρακάτω:

Πίνακας 5.22: Τιμές γεωδυναμικό στα 500hPa (gpdm) για κάθε ξεχωριστή προσομοίωση με αρχικοποίηση από τις 01 έως τις 05 Ιανουαρίου. Οι τιμές αναπαριστούν το μέσο όρο γεωδυναμικού της περιοχής από 37 έως 50 βόρειο και 260 έως 283 Δυτικά. Η τελευταία στήλη αναπαριστά το μέσο όρο κάθε πεντάδας για την εκάστοτε ημέρα και η προτελευταία στήλη τις τιμές των αναλύσεων για τις ημερομηνίες αυτές.

Ημερομ.	Αρχικοπ. 05/01	Αρχικοπ. 04/01	Αρχικοπ. 03/01	Αρχικοπ. 02/01	Αρχικοπ. 01/01	Δεδομένα αναλύσεων	Μέσος όρος
25/1/2014	534	536,53	542,66	500,27	527,43	515,68	528,178
26/1/2014	514,82	526,44	544,23	504,2	516,9	514,27	521,318
27/1/2014	516,24	527,92	532,41	515,6	505,26	509,11	519,486
28/1/2014	516,58	545,71	522,56	516,39	513,36	511,8	522,92
29/1/2014	520,9	552,01	524,93	523,9	513,78	517,77	527,104

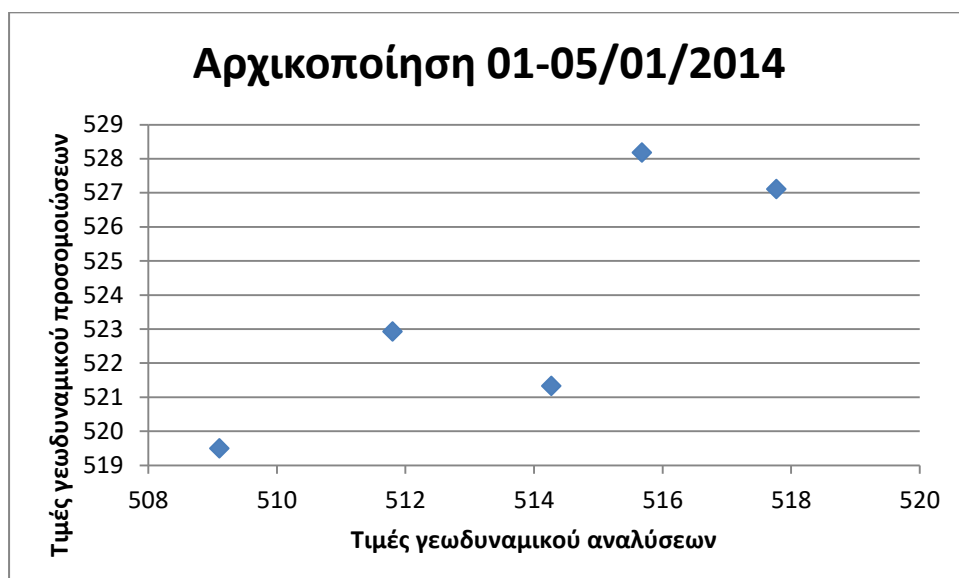
Πίνακας 5.23: Τιμές θερμοκρασίας (°C) στα 850hPa για κάθε ξεχωριστή προσομοίωση με αρχικοποίηση από τις 01 έως τις 05 Ιανουαρίου. Οι τιμές αναπαριστούν το μέσο όρο γεωδυναμικού της περιοχής από 37 έως 50 βόρειο και 260 έως 283 Δυτικά. Η τελευταία στήλη αναπαριστά το μέσο όρο κάθε πεντάδας για την εκάστοτε ημέρα και η προτελευταία στήλη τις τιμές των αναλύσεων για τις ημερομηνίες αυτές.

Ημερομ.	Αρχικοπ. 05/01	Αρχικοπ. 04/01	Αρχικοπ. 03/01	Αρχικοπ. 02/01	Αρχικοπ. 01/01	Μέσος όρος	Δεδομένα αναλύσεων
25/1/2014	-3,14	-1,88	0,87	-28,05	-7,32	-7,904	-11,87
26/1/2014	-8,92	-4,49	3,37	-28,39	-14,95	-10,676	-13,38
27/1/2014	-14,83	-10,61	-4,13	-17,42	-22,28	-13,854	-19,63
28/1/2014	-19,21	-3,99	-14,21	-18,36	-19,02	-14,958	-22,17
29/1/2014	-17,77	3,29	-14,54	-13,98	-21,31	-12,862	-16,46

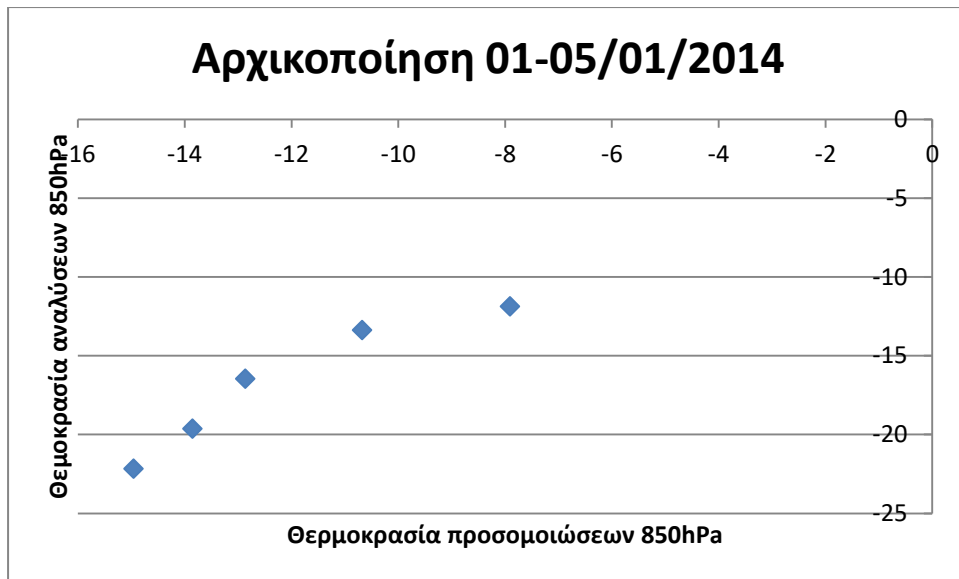
Οι τιμές του bias και του rmse που προκύπτουν για γεωδυναμικό στα 500hPa και θερμοκρασία στα 850hPa αντίστοιχα είναι:

Πίνακας 5.24: Τιμές bias και rmse για τα πεδία του γεωδυναμικού στα 500hPa και θερμοκρασίας στα 850hPa για τις προσομοιώσεις με αρχικοποίηση 01-05 Ιανουαρίου 2014 για την Μέθοδο 3.

Geopotential Height 500hPa	
Bias	Rmse
10,07	10,24
Temperature 850hPa	
Bias	Rmse
4,65	4,92



Σχήμα 5.32: Ομοίως με το σχήμα 5.27 για την LAF2 και την ΜΕΘΟΔΟ 3



Σχήμα 5.33: Ομοίως με το σχήμα 5.27 για την LAF2 και ΜΕΘΟΔΟ 3

Τέλος για την σύγκριση των τριών διαφορετικών ειδών προσομοιώσεων για διαφορετικά δεδομένα θαλάσσιων θερμοκρασιών το bias και το rmse για όλες τις διαφορετικές περιπτώσεις παρουσιάζεται στον πίνακα 4.27.

Πίνακας 5.25: Τιμές bias και rmse για τις προσομοιώσεις με αρχικοποίηση 01-05/01/2014 και διαφορετικές θερμοκρασίες θάλασσας.

Γεωδυναμικό ύψος (gpdm)		
	bias	rmse
SSTs αναλύσεων	4,14	5,82
SSTs σταθερά	7,72	8,15
SSTs ανωμαλίες από κλιματικές τιμές	10,07	10,24
Θερμοκρασία (C) στα 850hPa		
	bias	rmse
SSTs αναλύσεων	4,45	6,57
SSTs σταθερά	5,82	7,14
SSTs ανωμαλίες από κλιματικές τιμές	4,65	6,9

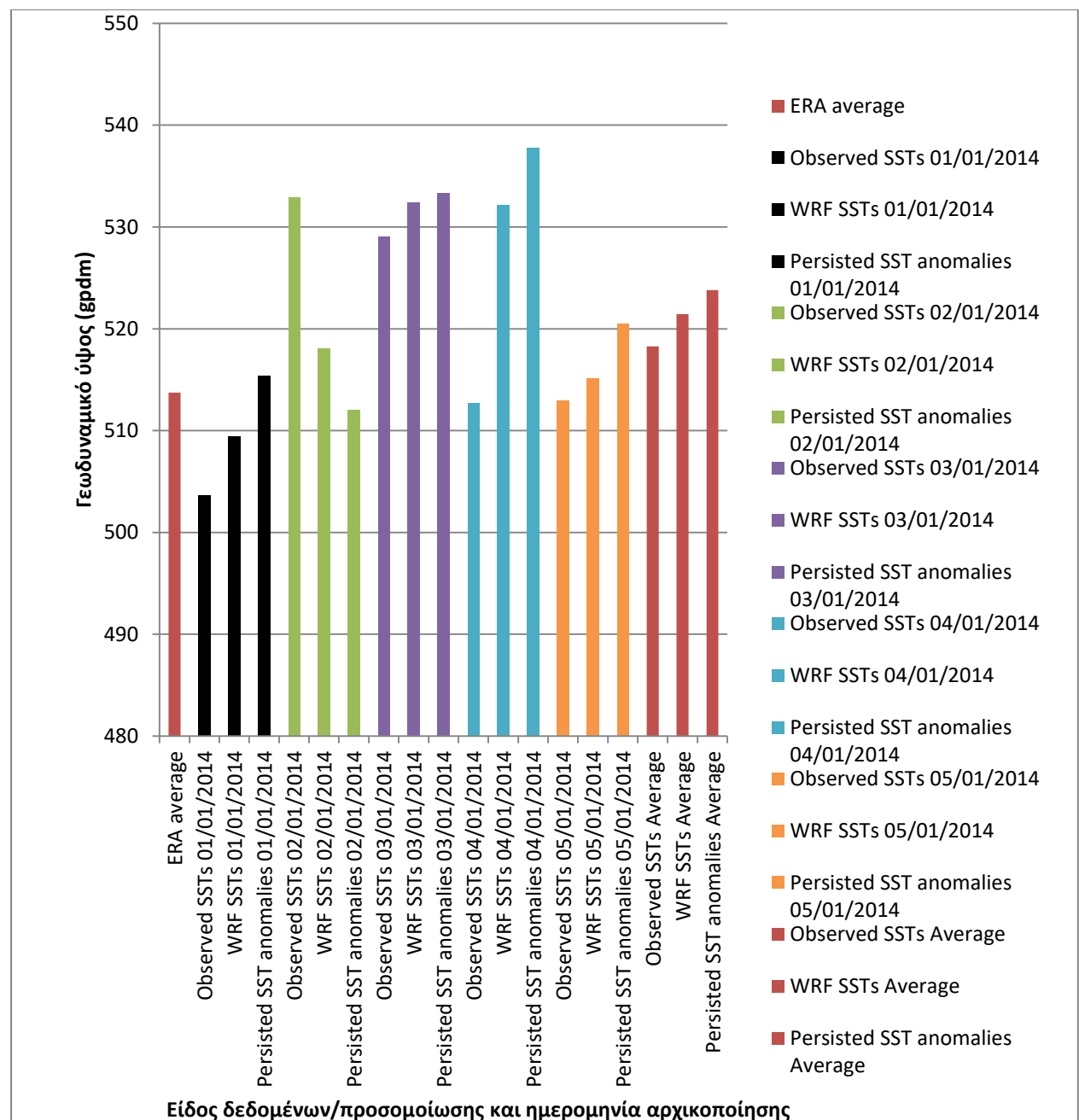
Όπως αναμενόταν παρατηρείται ότι οι προσομοιώσεις που χρησιμοποιούν τις πραγματικές θερμοκρασίες θαλασσών οι οποίες ανανεώνονται κάθε 24 ώρες έχουν τις καλύτερες τιμές προγνωσιμότητας. Σχετικά με τα άλλα δύο είδη προσομοιώσεων έχουν παρόμοια στατιστικά καθώς το ένα παρουσιάζει καλύτερα νούμερα στο πεδίο γεωδυναμικού 500hPa ενώ το άλλο στο πεδίο των θερμοκρασιών στα 850hPa. Καθώς οι προσομοιώσεις με τιμές θερμοκρασίας θαλασσών προερχόμενες από τις αποκλίσεις από τις κλιματικές είναι πιο κοντά στις πραγματικές τιμές θα περιμέναμε το συγκεκριμένο σετ πέντε προσομοιώσεων να επιτυγχάνει καλύτερα νούμερα και στο πεδίο γεωδυναμικού ύψους και στο πεδίο θερμοκρασιών, κάτι το οποίο δεν παρατηρήθηκε. Εν κατακλείδι και αν θέλουμε να δούμε την γενικότερη εικόνα της κυκλοφορίας οι περισσότερες των προσομοιώσεων με απόσταση 20-30 ημέρες από το

γεγονός ήταν ικανές να προβλέψουν μια κυκλοφορία με αντικυκλωνικές συνθήκες στην περιοχή της Δυτικής Βόρειας Αμερικής και έντονους αυλώνες στα ανατολικά τμήματα.

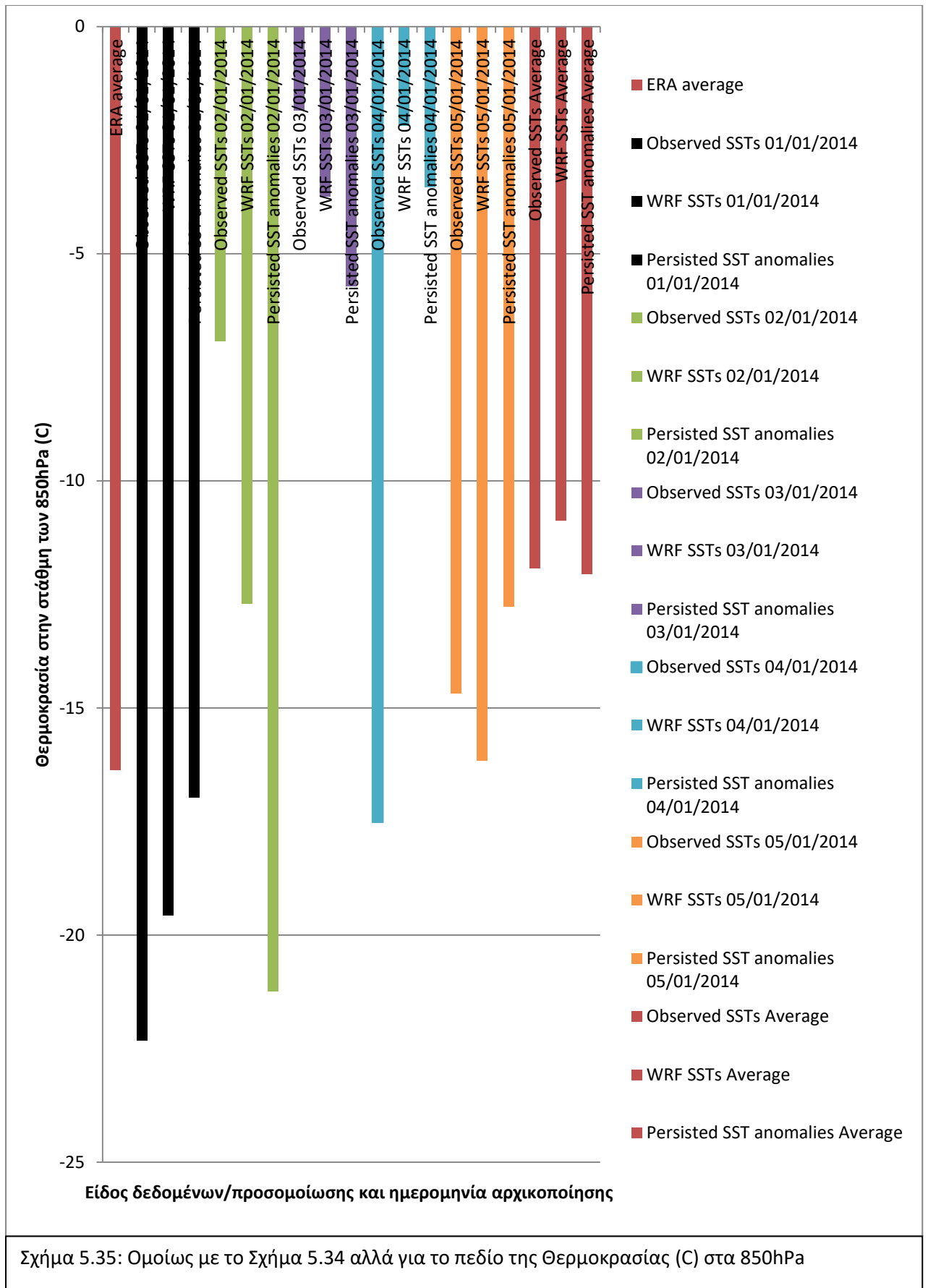
5.8 Γραφική απεικόνιση στατιστικών μέτρων

Εκτός των στατιστικών μέτρων τα οποία υπολογίσθηκαν για την ποσοτικοποίηση της ικανότητας αναπαράστασης της περιόδου ενδιαφέροντος (25-29/01/2014) απο το μοντέλο GWRP, διάφορα γραφικά παράχθηκαν για την περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Αρχικά για το πεδίο των γεωδυναμικών υψών (grdm) στα 500hPa και το πεδίο της Θερμοκρασίας στα 850hPa διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν τις μεσοποιημένες τιμές των δύο πεδίων για την περίοδο ενδιαφέροντος, για κάθε διαφορετική προσομοίωση της LAF2 (Αρχικοποίηση 01-05/01/2014) και για κάθε διαφορετική μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για να γίνουν οι προσομοιώσεις δημιουργήθηκαν (Σχήματα 5.34-5.35). Η μεσοποίηση έχει γίνει και χρονικά (δηλαδή μια τιμή για όλες τις μέρες της περιόδου ενδιαφέροντος) και χωρικά (μεσοποίηση των τιμών κάθε πεδίου για κάθε χρονική στιγμή σε όλο το κουτί αναφοράς). Όπως έχει προαναφερθεί για την LAF2 (αρχικοποίηση 01-05/01/2014) και για κάθε διαφορετική ημέρα έχουν γίνει προσομοιώσεις με τρεις διαφορετικές μεθόδους.

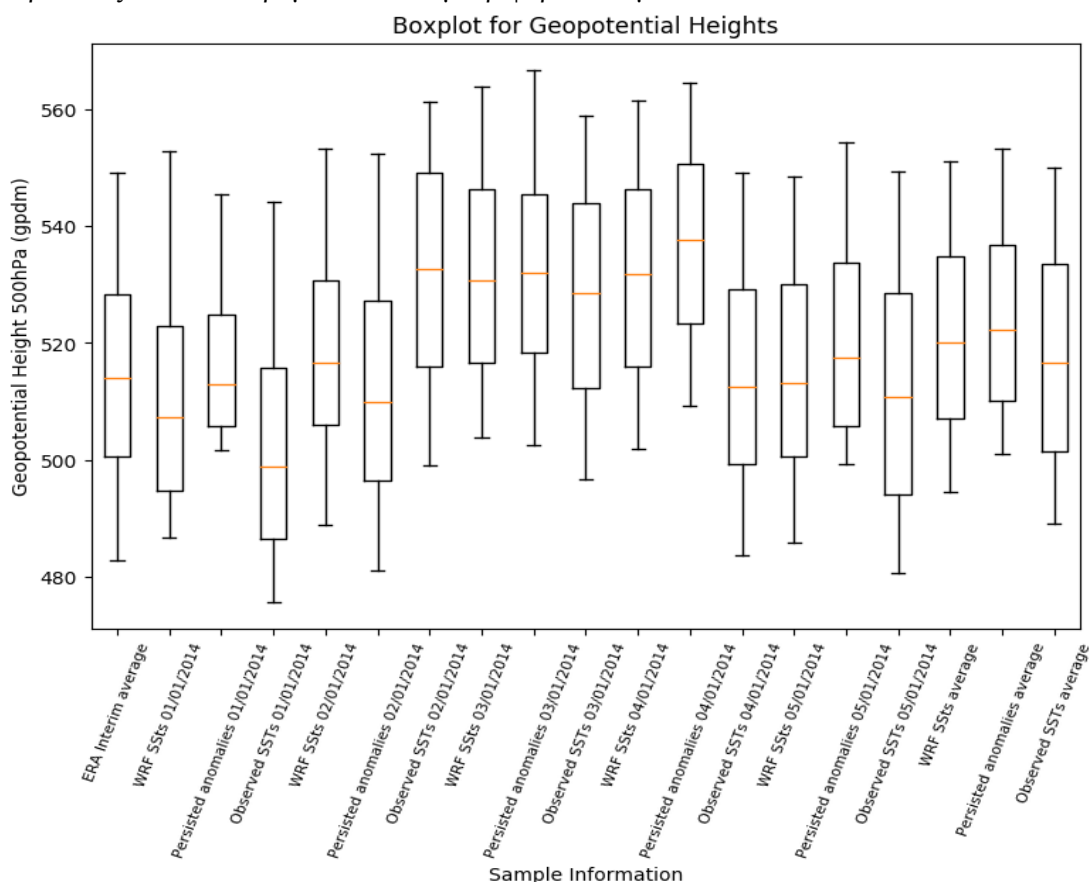
Τα Σχήματα 5.34-5.35 περιλαμβάνουν τις τιμές όλων των διαφορετικών μεθόδων για κάθε διαφορετική μέρα αρχικοποίησης καθώς και τη μέση τιμή κάθε μεθόδου για όλες τις προσομοιώσεις που έχουν γίνει το διάστημα 01-05/01/2014. Στο Σχήμα 5.34 το οποίο αναφέρεται στα γεωδυναμικά ύψη παρατηρούμε ότι αν και κάθε ξεχωριστή προσομοίωση μπορεί να παρουσιάζει αρκετά μεγάλες αποκλίσεις απο την μέση τιμή που καταγράφηκε (ERA average), οι μέσοι όροι των διαφορετικών προσομοιώσεων παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές με τις τιμές των αναλύσεων με τις τρεις διαφορετικές μεθόδους να είναι αρκετά κοντά στην πραγματική τιμή. Την καλύτερη προγνωσιμότητα, την παρουσιάζει η ΜΕΘΟΔΟΣ 1 στην οποία οι προσομοιώσεις βασίζονται σε πραγματικές θερμοκρασίες θαλασσών. Όσο αναφορά το Σχήμα 5.35 και τις θερμοκρασίες στα 850hPa παρατηρούμε ότι οι ξεχωριστές προσομοιώσεις παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις απο τις τιμές των αναλύσεων, με μερικές προσομοιώσεις να έχουν πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες απο τις πραγματικές. Αυτό συνέβη όχι γιατί η προσομοίωση τις ημέρες εκείνες παρουσίαζε άλλη κυκλοφορία σε σχέση με την πραγματική αλλά επειδή οι θέσεις του αντικυκλώνα και του αυλώνα ήταν μετατοπισμένες σε σχέση με τις αναλύσεις. Απο την άλλη οι μέσες τιμές των προσομοιώσεων παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με αυτή που περιγράφηκε στην περίπτωση των γεωδυναμικών υψών.



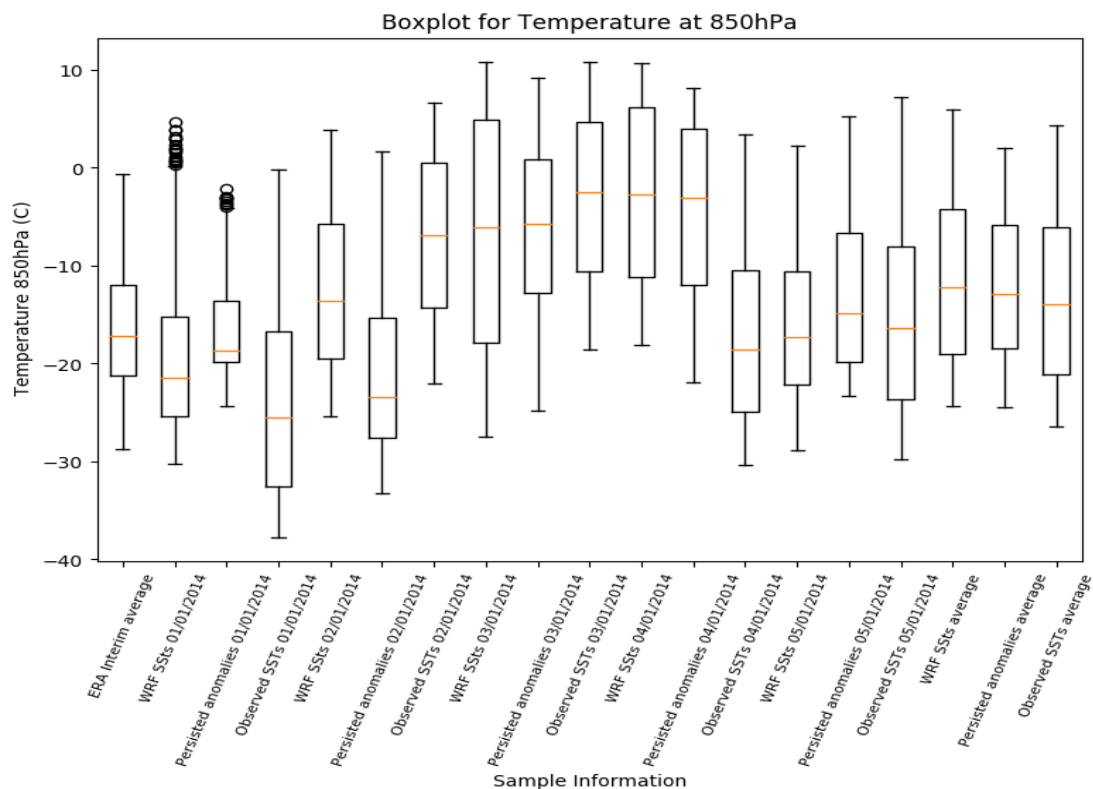
Σχήμα 5.34: Μεσοποιημένες τιμές γεωδυναμικού ύψους (gpdm) σε την περίοδο ενδιαφέροντος (25-29/01/2014), για κάθε διαφορετική προσομοίωση της LAF2 (Αρχικοποίηση 01-05/01/2014) και για κάθε διαφορετική μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για να γίνουν οι προσομοιώσεις. Η λεζάντα 'Observed SSTs' αντιστοιχεί στις προσομοιώσεις που έγιναν με τις πραγματικές θερμοκρασίες θάλασσας, η λεζάντα 'WRF SSTs' στις προσομοιώσεις όπου οι θερμοκρασίες θαλασσών ανανεώνονταν απο το ίδιο το μοντέλο, ενώ η λεζάντα 'Persisted SST anomalies' αντιστοιχεί στις προσομοιώσεις της μεθόδου 3 (περιγράφηκε στις προηγούμενες υποενότητες). Τέλος με την λεζάντα 'ERA average' υποδηλώνονται οι τιμές των αναλύσεων για την περίοδο ενδιαφέροντος. Μαύρο χρώμα υποδηλώνει προσομοιώσεις με αρχικοποίηση στις 01/01/2014, πράσινο χρώμα προσομοιώσεις με αρχικοποίηση 02/01/2014, μώβ χρώμα προσομοιώσεις με αρχικοποίηση 03/01/2014 και γαλάζιο και πορτοκαλί χρώμα προσομοιώσεις με αρχικοποίηση 04&05/01/2014 αντίστοιχα. Τέλος με κόκκινο χρώμα υποδηλώνεται η μέση τιμή όλων των προσομοιώσεων κάθε ξεχωριστής μεθόδου



Στη συνέχεια θηκογράμματα παράχθηκαν για να μελετηθεί η διασπορά των τιμών των δύο πεδίων γύρω από την μέση τιμή και την διάμεσο τους, και να γίνει σύγκριση με αυτά των αναλύσεων (Σχήματα 5.36-5.37). Για τις τιμές των θηκογραμμάτων μόνο χρονική μέσοποίηση έχει γίνει σε όλη την περίοδο ενδιαφέροντος. Οι τιμές όλων των πλεγματικών σημείων που βρίσκονται μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος έχουν χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή των θηκογραμμάτων. Όπως φαίνεται στο θηκόγραμμα που αντιστοιχεί στο πεδίο των γεωδυναμικών υψών (Σχήμα 5.36) η διασπορά των τιμών γεωδυναμικού ύψους των προσομοιώσεων γύρω από την διάμεσο είναι παρόμοια με την διασπορά των τιμών των αναλύσεων. Επίσης τα θηκογράμματα που αντιστοιχούν στους μέσους όρους των τριών διαφορετικών μεθόδων έχουν παραπλήσιες τιμές καθώς και διασπορές με αυτές της ανάλυσης. Όσον αφορά το πεδίο των θερμοκρασιών στα 850hPa (Σχήμα 5.37) οι αποκλίσεις και οι διασπορές είναι μεγαλύτερες όπως έγινε και με το διάγραμμα του Σχήματος 5.35. Παρόλα αυτά οι τα θηκογράμματα των μέσων τιμών των τριών μεθόδων και εδώ παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με αυτό των αναλύσεων.

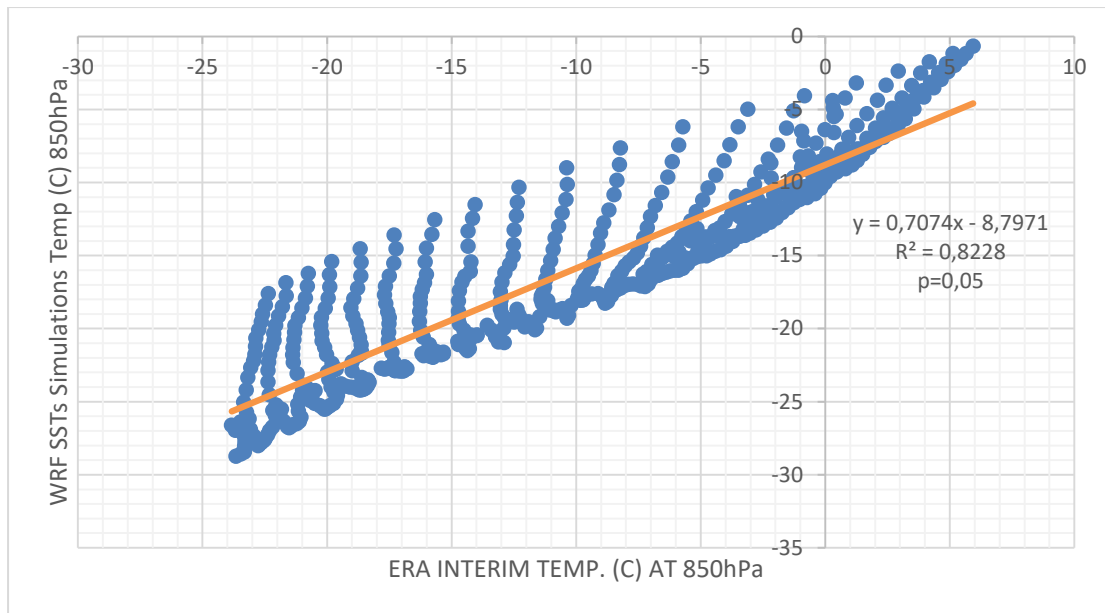


Σχήμα 5.36: Θηκόγραμμα για τις τιμές των γεωδυναμικών υψών (gpdm) στα 500hPa μεσοποιημένες σε όλη την περίοδο ενδιαφέροντος. Οι προσομοιώσεις για τις οποίες έγιναν θηκογράμματα είναι ακριβώς ίδιες με αυτές των Σχημάτων 5.34-5.35. Η σειρά επίσης των θηκογραμμάτων από αριστερά προς τα δεξιά είναι ακριβώς η ίδια με την σειρά των προσομοιώσεων των Σχημάτων 5.34-5.35. Με πορτοκαλί χρώμα στο εσωτερικό του κάθε θηκογραμματος αναπαριστάται η διάμεσος των τιμών του πεδίου.

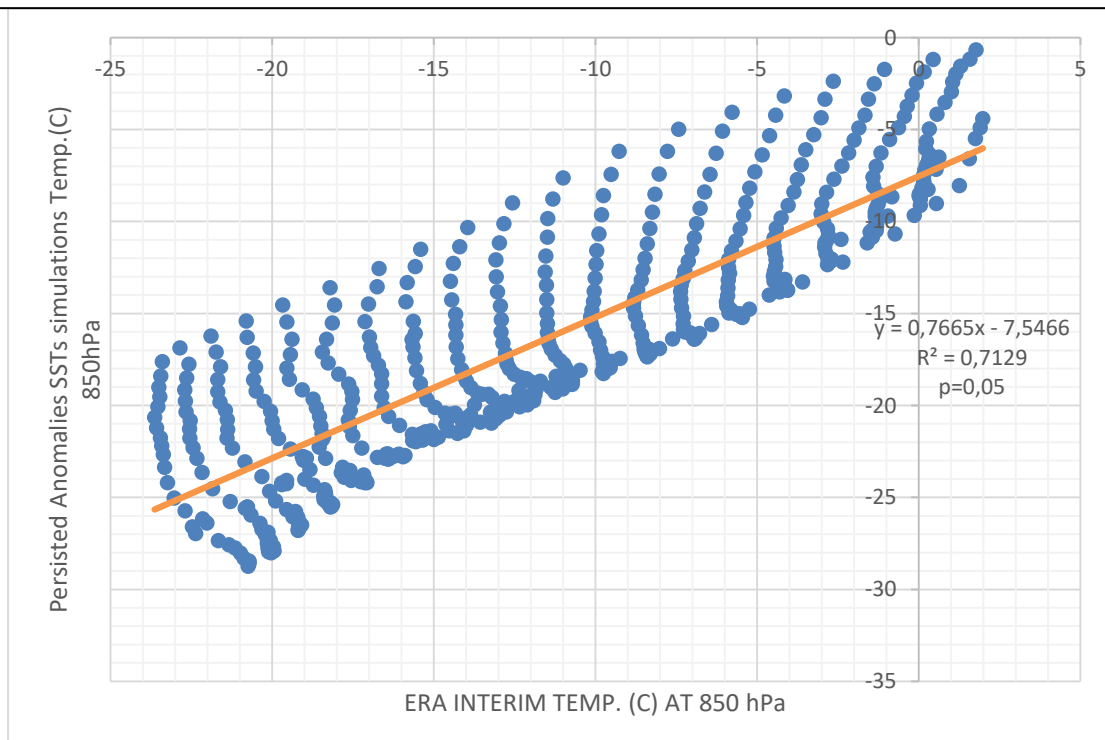


Σχήμα 5.37: Ομοίως με το Σχήμα 5.36 για το πεδίο της Θερμοκρασίας (C) στα 850hPa.

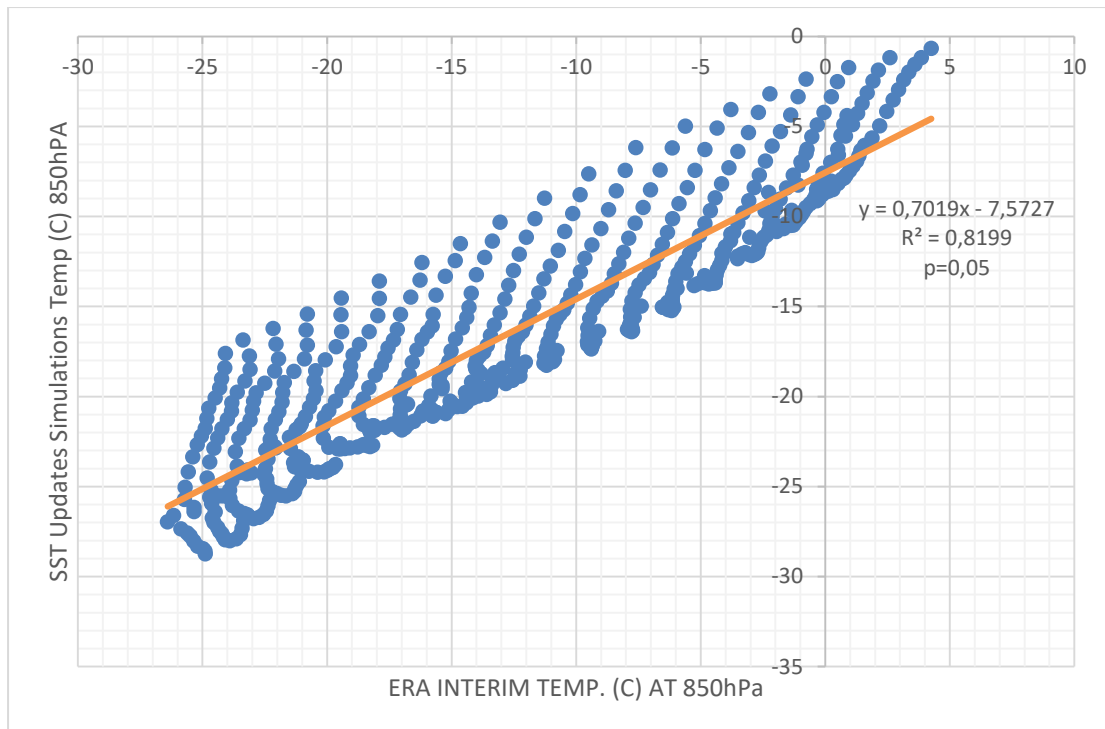
Τέλος διαγράμματα διασπορών δημιουργήθηκαν για τα πεδία του γεωδυναμικού ύψους (grdm) στα 500hPa και Θερμοκρασίας (C) στα 850hPa (Σχήματα 5.38-5.43). Στα διαγράμματα διασπορών έχουμε τις μεσοποιημένες χρονικά τιμές για όλη την περίοδο ενδιαφέροντος (25-29/01/2014) των μέσων όρων των τριών μεθόδων για όλες τις προσομοιώσεις που έγιναν με αρχικοποίηση από 01 έως 05 του Ιανουαρίου. Έτσι έχουμε τρία διαγράμματα για τις τρεις διαφορετικές μεθόδους για το γεωδυναμικό ύψος και άλλα τρία για το πεδίο της Θερμοκρασίας. Στον άξονα των x έχουμε τις τιμές των γεωδυναμικών υψών/θερμοκρασιών των αναλύσεων ενώ στον άξονα των y έχουμε τις αντίστοιχες τιμές στα ίδια πλεγματικά σημεία των μέσων όρων των τριών διαφορετικών μεθόδων για κάθε πεδίο. Για παράδειγμα στο Σχήμα 5.38 έχουμε τις τιμές των γεωδυναμικών υψών των προσομοιώσεων που έγιναν με θερμοκρασίες θάλασσας που ανανεώνονταν από το μοντέλο σε αντιστοιχία με τις τιμές των γεωδυναμικών υψών των αναλύσεων. Σε όλα τα σχήματα διασπορών παρατηρείται ότι τα δεδομένα ακολουθούν ένα μοτίβο γραμμών οι οποίες έχουν κάποια απόσταση μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει επειδή η περιοχή ενδιαφέροντος αποτελείται από δεδομένα διαφορετικών γεωγραφικών πλατών. Έτσι στην ουσία κάθε διαφορετική ‘γραμμή ή καμπύλη’ αντιστοιχεί και σε ένα διαφορετικό γεωγραφικό πλάτος. Σε όλα τα σχήματα έχει παραχθεί η γραμμή τάσης και έχει υπολογισθεί το τετράγωνο του συντελεστή συσχέτισης των δεδομένων. Παρατηρείται ότι σχεδόν όλα τα σχήματα παρουσιάζουν τιμές του τετραγώνου του συντελεστή συσχέτισης οι οποίες είναι αρκετά μεγάλες πράγμα το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των δεδομένων των προσομοιώσεων και των δεδομένων των αναλύσεων, καθώς και συμμεταβλητότητα αυτών (οι συντελεστές συσχέτισης είναι όλοι θετικοί).



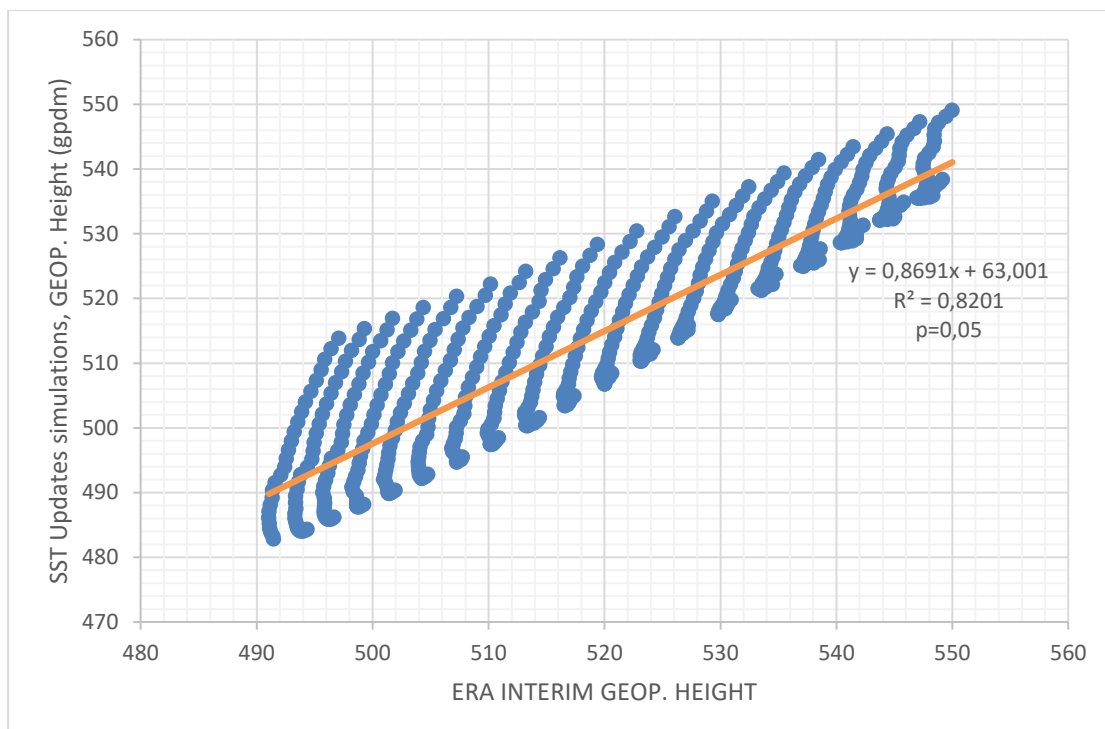
Σχήμα 5.38: Διαγράμμα διασποράς για τις μεσοποιημένες χρονικά τιμές της Θερμοκρασίας (C) στα 850hPa για όλη την περίοδο ενδιαφέροντος. Στον άξονα των x έχουμε τις τιμές του γεωδυναμικού ύψους των αναλύσεων ενώ στον άξονα των y τις τιμές των προσομοιώσεων της LAF2 για προσομοιώσεις που έγιναν με θερμοκρασίες θαλασσών που ανανεώνονταν απο το μοντέλο. Με τις μπλέ κουκίδες αναπαριστάται η τιμή κάθε ξεχωριστού πλεγματοειδούς σημείου της περιοχής ενδιαφέροντος ενώ η πορτοκαλί γραμμή είναι η γραμμή τάσης



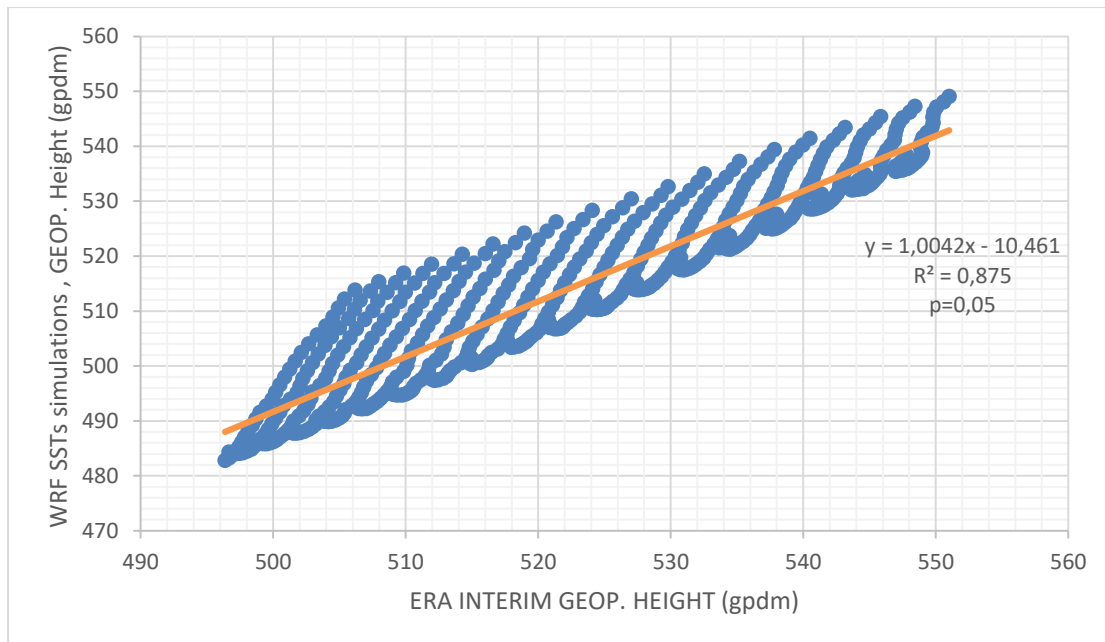
Σχήμα 5.39: Ομοίως με το σχήμα 5.38. Στον άξονα των y έχουμε τα δεδομένα των προσομοιώσεων που έγιναν με θερμοκρασίες θαλασσών οι οποίες προέκυπταν απο τις ανωμαλίες απο τις κλιματικές τιμές



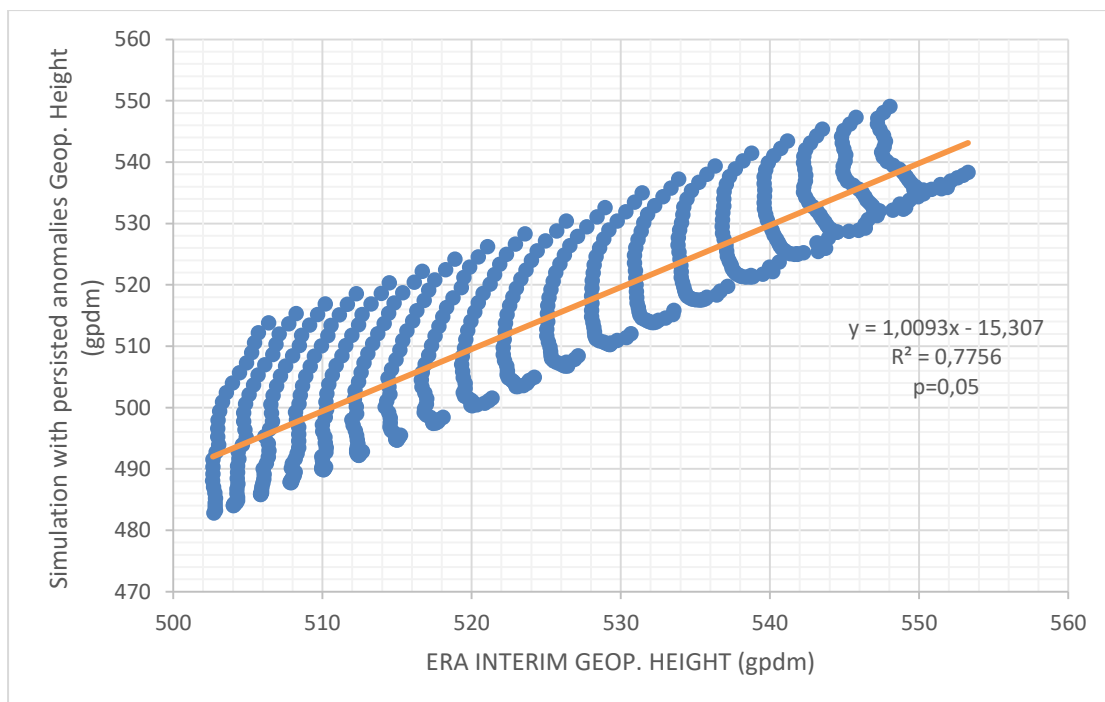
Σχήμα 5.40: Ομοίως με το σχήμα 5.38. Στον άξονα των γ έχουμε τα δεδομένα των προσομοιώσεων που έγιναν με τις πραγματικές θερμοκρασίες θαλασσών



Σχήμα 5.41: Ομοίως με το σχήμα 5.40 για το πεδίο του γεωδυναμικού ύψους(gpdm) στα 500hPa



Σχήμα 5.42: Ομοίως με το σχήμα 5.38 για το πεδίο του γεωδυναμικού ύψους(gpdm) στα 500hPa



Σχήμα 5.43: Ομοίως με το σχήμα 5.39 για το πεδίο του γεωδυναμικού ύψους(gpdm) στα 500hPa

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Ο χειμώνας του 2013-2014 παρουσίασε θετικές ανωμαλίες γεωδυναμικών υψών στην περιοχή των Δυτικών ακτών της Βόρειας Αμερικής και αρνητικές ανωμαλίες γεωδυναμικών υψών στην περιοχή της Ανατολικής Βορείου Αμερικής. Αυτές συνδυάστηκαν με έντονες θερμές απόκλίσεις στα ανατολικά και έντονες ψυχρές απόκλίσεις στα ανατολικά τμήματα.
- Η κυκλοφορία χαρακτηρίστηκε από έντονη μεσημβρινότητα με μια ράχη υψηλών υψών να εκτείνεται από το ύψος των Δυτικών ακτών της Βορείου Αμερικής έως περιοχές της Αρκτικής. Αυλώνας παρατηρήθηκε στην περιοχή της κεντρικής και Ανατολικής Βορείου Αμερικής.
- Μετατόπιση του πολικού στρόβιλου στη στάθμη της μέσης και ανώτερης τροπόσφαιρας προς περιοχές του Καναδά και της Βορείου Αμερικής παρατηρήθηκε κατά τον χειμώνα του 2013-2014
- Ουδέτερη φάση του ENSO στον Ειρηνικό σε συνδυασμό με θερμές απόκλίσεις θερμοκρασιών θάλασσας είναι πιθανόν να οδήγησαν στην εγκαθίδρυση της συγκεκριμένης κυκλοφορίας στην Βόρεια Αμερική.
- Ανωμεταφορά πλανητικών κυμάτων παρατηρήθηκε από την τροπόσφαιρα προς την στρατόσφαιρα στην περιοχή της Σιβηρίας και κατωμεταφορά στην περιοχή του Καναδά η οποία ενδέχεται να συνέβαλε στην ενίσχυση της σκάφης χαμηλών υψών στις κεντρικές και ανατολικές περιοχές της Βόρειας Αμερικής.
- Ικανοποιητική προσομοίωση της περιόδου ενδιαφέροντος (25-29 Ιανουαρίου 2014) επιτεύχθηκε από τις πρώτες τρεις LAF που αρχικοποιήθηκαν από τις καθημερινές αναλύσεις των 00:00 UTC στις περιόδους 06/01/14-10/01/14 (LAF1), 01/01/14-05/01/14 (LAF2) και 27/12/13-31/12/13 (LAF3). Η τέταρτη LAF η οποία αρχικοποιήθηκε 22/01/13-26/01/13 παρουσίασε αρκετά χαμηλότερες τιμές προγνωσιμότητας της περιόδου ενδιαφέροντος σε σχέση με τις προηγούμενες τρεις. Στις παραπάνω προσομοιώσεις είχαμε καθημερινή ανανέωση των επιφανειακών θερμοκρασιών της θάλασσας με τις πραγματικές θερμοκρασίες θαλασσών που παρατηρήθηκαν εκείνο το διάστημα.
- Ικανοποιητική προγνωσιμότητα του γεγονότος από το GWRF μέσω της μεθόδου Lagged Average Forecast έχουμε έως πριν 20 με 25 ημέρες πριν το γεγονός (τιμές bias για το γεωδυναμικό κάτω των 4gpdm για τις LAF1,LAF2,LAF3 και τιμές RMSE κάτω των 6gpdm αντίστοιχα). Το σήμα της κυκλοφορίας εξασθενεί καθώς απόμακρυνόμαστε περαιτέρω από την περίοδο ενδιαφέροντος.

- Σχεδόν το σύνολο των προσομοιώσεων προσομοιώνουν με ικανοποιητική τη θέση και την ένταση του Αυλώνα στην περιοχή της Βορείου Αμερικής ενώ αβεβαιότητα παρουσιάζεται στη θέση του Αντικυκλώνα στην περιοχή των Δυτικών ακτών της Βορείου Αμερικής και του Ανατολικού Ειρηνικού
- Περαιτέρω μελέτη του γεγονότος επιτευχθηκε με προσομοιώσεις χωρίς την καθημερινή ανανέωση των επιφανειακών θερμοκρασιών θάλασσας, αλλά μέσω πρόγνωσης των θερμοκρασιών θάλασσας από το ίδιο το μοντέλο (ΜΕΘΟΔΟΣ 2) καθώς και μέσω της μεθόδου με τις ανωμαλίες απο τις μέσες κλιματικές τιμές των τελευταίων 30 ετών (ΜΕΘΟΔΟΣ 3).
- Και οι δύο παραπάνω μέθοδοι αν και χειρότερες προγνωστικά σε σχέση με την αρχική μέθοδο που χρησιμοποιήθηκαν πραγματικές θερμοκρασίες θάλασσας ήταν ικανές να αναπαραστήσουν την ατμοσφαιρική κυκλοφορία που επικράτησε στην Βόρεια Αμερική την τελευταία εβδομάδα του Ιανουαρίου.
- Μελλοντική έρευνα θα μπορεί να περιλαμβάνει προσομοιώσεις με άλλο παγκόσμιο μοντέλο με άλλα χαρακτηριστικά και σύγκριση με τις υπάρχουσες μπορούν να οδηγήσουν σε συμπεράσματα για τους κύριους παράγοντες που οδηγούν στην υπάρχουσα κυκλοφορία καθώς και το μέγιστο όριο προγνωσιμότητας της.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ahrens, C. Donald (2013). *Meteorology Today, An introduction to Weather, Climate, and the Environment*, 9th Edition

Alessandri A., A. Borrelli, A. Navarra, A. Arribas, M. Déqué, P. Rogel, and A. Weisheimer, (2011): Evaluation of probabilistic quality and value of the ENSEMBLES multi-model seasonal forecasts: comparison with DEMETER. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 581-607, doi:10.1175/2010MWR3417.1.

Ambaum, M. H., and B. J. Hoskins, 2002: The NAO troposphere–stratosphere connection. *J. Climate*, 15, 1969–1978, doi:10.1175/1520-0442(2002)015 <1969:TNTSC>2.0.CO;2.

Barras, V., and I. Simmonds, (2009): Observation and modeling of stable water isotopes as diagnostics of rainfall dynamics over southeastern Australia *Journal of Geophysical Research*, 114, D23308, doi:10.1029/2009JD012132, 200

Barnes, E. A., 2013: Revisiting the evidence linking Arctic amplification to extreme weather in midlatitudes. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 4734–4739, doi:10.1002/grl.50880.

Barnston, AG, Mason SJ, Goddard L, Dewitt DG, Zebiak SE, (2003): Multimodel ensembling in seasonal climate forecasting at IRI. *Bull Am Meteor Soc* 84:1783-1796

Buizza Roberto (2014): Sources of Uncertainty, ECMWF Predictability TC. http://www.ecmwf.int/staff/roberto_buizza/

Bunzel, F., Müller, W. A., Dobrynin, M., Fröhlich, K., Hagemann, S., Pohlmann, H. Baehr, J. (2018). Improved seasonal prediction of European summer temperatures with new five-layer soil-hydrology scheme. *Geophysical Research Letters*, 45, 346–353. <https://doi.org/10.1002/2017GL076204>

Cohen, J., et al. (2014), Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather, *Nat. Geosci.*, 7, 627–637, doi:10.1038/ngeo2234.

Cottrill, A., H.H. Hendon, E. Lim, S. Langford, K. Shelton, A. Charles, D. McClymont, D. Jones, and Y. Kuleshov, (2013): Seasonal Forecasting in the Pacific Using the Coupled Model POAMA-2. *Wea. Forecasting*, 28, 668–680, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-12-00072.1>

Courant, R.; Friedrichs, K.; and Lewy, H. (1967): "On the Partial Difference Equations of Mathematical Physics." *IBM J.* 11, 215-234, 1967.

Della-Marta P. M., J. Luterbacher, H. von Weissenfluh, E. Xoplaki, M. Brunet, H. Wanner (2007): Summer heat waves over western Europe 1880–2003, their relationship to large-scale forcings and predictability. *Clim Dyn* (2007) 29:251–275: DOI 10.1007/s00382-007-0233-1

Francis, J. A., and S. J. Vavrus, 2012: Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L06801, doi:10.1029/2012GL051000.

Graham, R. J., Evans, A. D., Mylne, K. R., Harrison, M. S. and Robertson, K. B. (2000): An assessment of seasonal predictability using atmospheric general circulation models. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 126: 2211-2240. doi:10.1002/qj.49712656712

Hartmann, D. L. (2015), Pacific sea surface temperature and the winter of (2014): *Geophys. Res. Lett.*, 42, 1894–1902. doi: 10.1002/2015GL063083.

Hoffman Ross N. and Eugenia Kalnay, (1983): Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting. *Tellus*, 2 August 1982. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.1983.tb00189.x>

Horanont T, Phithakkitnukoon S, Leong TW, Sekimoto Y, Shibasaki R. (2013): Weather Effects on the Patterns of People’s Everyday Activities: A Study Using GPS Traces of Mobile Phone Users. Lambiotte R, ed. *PLoS ONE*. 2013;8(12):e81153. doi:10.1371/journal.pone.0081153.

Howard B. Bluestein, (1992): Synoptic-dynamic Meteorology in Midlatitudes: Principles of kinematics and dynamics. Oxford University Press

IPCC, (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.

James R. Holton, (2004). An introduction to Dynamic Meteorology, 5th Edition. Elsevier Academic Press.

Jensen Andrew D. (2015): “A Dynamic Analysis of a Record Breaking Winter Season Blocking Event,” *Advances in Meteorology*, vol. 2015, Article ID 634896, 9 pages, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/634896>.

Katsafados, P., A. Papadopoulos, and G. Kallos (2005), Regional atmospheric response to tropical Pacific SST perturbations, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L04806, doi: 10.1029/2004GL021828.

Katsafados P., Papadopoulos A., Varlas G., Papadopoulou E. and Mavromatidis E., (2014): Seasonal predictability of the 2010 Russian heat wave, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 1531-1542, doi:10.5194/nhess-14-1531-2014, 2014.

Lee, M.-Y., Hong, C.-C. and Hsu, H.-H. (2015): Compounding effects of warm sea surface temperature and reduced sea ice on the extreme circulation over the extratropical North

Pacific and North America during the 2013–2014 boreal winter. *Geophys. Res. Lett.*, 42: 1612–1618. doi: 10.1002/2014GL062956.

Lin, Y. (2007): *Mesoscale Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press.
doi:10.1017/CBO9780511619649

Lui S. H. (2011): *Numerical Analysis of Partial Differential Equations*. John Wiley & Sons.
DOI:10.1002/9781118111130

Noone, D., and I. Simmonds, (1999): A three-dimensional spherical trajectory algorithm. Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, Report No. 28, WMO/TD-No. 942. H. Ritchie, Ed., World Meteorological Organization, 3.26–3.27.

Panagiotopoulos F., M. Shahgedanova and D.B. Stephenson (2002): A review of Northern Hemisphere winter-time teleconnection patterns, *J. Phys. IV France*, 12 10 (2002) 27–47.
DOI: <https://doi.org/10.1051/jp4:20020450>

Pepler Acacia S., Leandro B. Díaz, Chloé Prodhomme, Francisco J. Doblas-Reyes, Arun Kumar (2015): The ability of a multi-model seasonal forecasting ensemble to forecast the frequency of warm, cold and wet extremes, *Weather and Climate Extremes*, Volume 9, 2015, Pages 68–77, ISSN 2212-0947, <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.06.005>.

Ryan Michael S. , Amanda Fanning, Mary Beth Gerhardt, Kwan-Yin Kong, Jason Krekeler, Allison Santorelli, Richard Otto, Frank J. Pereira, Brendon Rubin-Oster (2014): Major Winter Weather Events during the 2013–2014 Cold Season. NOAA/NWS/Weather Prediction Center, College Park, MD.

Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, (2008): A Description of the Advanced Research WRF Version 3. *NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR*, 113 pp.
doi:10.5065/D68S4MVH

Steppeler, J., Hess, R., Schättler, U. et al. *Meteorol Atmos Phys* (2003): 82: 287.
<https://doi.org/10.1007/s00703-001-0593-8>

Straus, D.M. and J. Shukla, (2002): Does ENSO Force the PNA?. *J. Climate*, 15, 2340–2358, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<2340:DEFTP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2340:DEFTP>2.0.CO;2)

Thompson, D. W. J., M. P. Baldwin, and J. M. Wallace, 2002: Stratospheric connection to Northern Hemisphere wintertime weather: Implications for prediction. *J. Climate*, 15, 1421–1428, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<1421:SCTNHW>2.0.CO;2.

Thornicroft, and I. Pytharoulis, (2001): A dynamical approach to seasonal prediction of Atlantic tropical cyclone activity. *Wea. Forecasting*, 16, 725–734.

TT-DEWCE WMO (2016): Guidelines on the definition and monitoring of extreme weather and climate events

Vitart Frederic & Andrew W. Robertson (2018): The sub-seasonal to seasonal prediction project (S2S) and the prediction of extreme events, npj *Climate and Atmospheric Science* Volume 1, Article number: 3 (2018).

Wang W, Bruyère C, Duda M, Dudhia J, Gill D, Kavulich M, Keene K, Lin H-C, Michalakes J, Rizvi S, Zhang X, Berner J, Fossell K, Beezley J, Coen J, Mandel J, Chuang H-Y, McKee N, Slovacek T, Wolff J (2016): ARW version 3 modeling system user's guide. NCAR-MMM

Wang, S.-Y., L. Hips, R. R. Gillies, and J.-H. Yoon (2014): Probable causes of the abnormal ridge accompanying the 2013–2014 California drought: ENSO precursor and anthropogenic warming footprint, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 3220–3226, doi: 10.1002/2014GL059748.

Waugh, D.W., A.H. Sobel, and L.M. Polvani, 2017: What Is the Polar Vortex and How Does It Influence Weather?. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98, 37–44, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00212.1>

Weisheimer, A., F. J. Doblas-Reyes, T. Jung, and T. N. Palmer (2011): On the predictability of the extreme summer 2003 over Europe, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L05704, doi: 10.1029/2010GL046455.

NOAA, National Centers for Environmental Information, GFS Analysis Datasets. <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>

ECMWF, ERA Interim, Daily Datasets. <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>

NOAA, Earth System Research Laboratory, Web-based Trajectory Tool. <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/trajtool/traj.pl>

NCEP, National Centers for Environmental Prediction, <http://www.ncep.noaa.gov/>

NASA Earth Observatory, <https://earthobservatory.nasa.gov/>

https://www.wpc.ncep.noaa.gov/winter_storm_summaries/event_reviews/2013-2014ColdSeasonArticle.pdf