Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Δημήτριος Α. Νατσιόπουλος

Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός, ΑΠΘ

Προσδιορισμός αναλυτικών συναρτήσεων συμμεταβλητότητας των ανωμαλιών της επιφάνειας της θάλασσας και της δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας για την στατιστική μελέτη των μεταβολών της στάθμης της θάλασσας

Μεταπτυχιακή διατριβή

που υποβλήθηκε στο Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών

της Πολυτεχνικής Σχολής του ΑΠΘ

Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών

Θεσσαλονίκη, Νοέμβριος 2012

"Sea Level Anomaly and Mean Dynamic Ocean Topography analytical covariance function determination to model sea level variations”

Extended Summary

This MSc. diploma thesis under the title "Sea level anomaly and mean dynamic ocean topography Analytical covariance function determination to model sea level variations" was elaborated by Dimitrios A. Natsiopoulos in partial fulfillment for the degree of Master Dipl. Eng. at the Department of Geodesy and Surveying School of Rural and Surveying Engineering (RSE), Faculty of Engineering, Aristotle University of Thessaloniki (AUTH).

The main focus of this work is on studying the SLA (Sea Level Anomaly) spectral characteristics based on empirically derived properties. Monitoring and understanding of sea level change at various spatial and temporal scales have been the focus of many studies during the past decades. The advent of satellite altimetry and the realization of the GRACE/GOCE missions offer new opportunities for the estimation of sea level trends with heterogeneous data combination methods. In related studies, even though the data combination and processing strategies have been carried out carefully with proper control, error propagation through analytical data variance-covariance matrices has been given little attention. The latter is of importance since it can provide reliable estimates of the output signal error. This is especially evident in e.g., least-squares collocation (LSC), where analytical covariance function models for the disturbing potential, its second order derivatives and geoid heights are used. No analytical models are available for altimetric sea level anomalies making their incorporation in LSC-based combination schemes problematic. This work presents some new ideas and results on the determination of analytical covariance functions for the sea level anomalies in the Mediterranean Sea. The focus is based on single-mission altimetry data from ENVISAT for the entire duration of the satellite mission (2002-2011). The estimation of the analytical covariance functions is performed using 2nd and 3rd order Gauss-Markov models, exponential ones, as well as a kernel similar to that of the disturbing potential.

The present study is focused in the entire Mediterranean basin, within the region bounded between $30^o \leq \phi \leq 50^o$ and $-10^o \leq \lambda \leq 40^o$. In this region, the statistical characteristics of the SLA have been studied using altimetric observations from ENVISAT for the entire duration its mission (2002-2011). The ENVISAT data are SLAs values relative to the EGM2008 geopotential model. All geophysical and instrumental corrections have been applied, so that corrected SLAs would be available.

The first chapter is dedicated to the problem statement and the objectives that this works needs to address. The goals and the reasoning for such a survey to be undertaken in the specific region are given while a general description of each diploma's chapter is given too in this chapter.

The second chapter summarizes the fundamental theory and measurement principles of satellite altimetry. At the beginning of the chapter recent altimetry history, applications and goals of the satellite missions are presented, while another part of the chapter is dedicated to the detailed description of the Envisat mission. A detailed analysis of empirical and analytical covariance functions is given. In order to study the statistical characteristics of the SLA, first the empirical covariance models were derived. Given a

set of observations for the functional $(\bullet)$ under consideration, in our case the SLA (h^{SLA}), the empirical covariances for a given spherical distance ψ is:

$$\boldsymbol{C}\left(h_i^{SLA}, h_j^{SLA}, \psi\right) = M\left\{h_i^{SLA} h_j^{SLA}\right\}_{\psi},$$

where, M denotes the mean value operator and i, j the SLA observations at two points in the area under study with a distance ψ. In order to determine some analytical model for the SLA covariance function various options have been tested. The first class of analytical models, refers to exponential ones, where six choices were examined, with varying number of parameters to be determined. The other class of analytical models tested, refers to 2nd and 3rd order Gauss-Markov ones while finally, an analytical model similar to the one for the disturbing potential has been used. Prediction with LSC is described while the chapter ends with the data description.

The third chapter deals with the two main sets of tests that have been carried out for the estimation of SLA analytical covariance functions. The first one refers to the use of a single pass of the satellite, in order to study the stochastic characteristics of the SLA in the along-track (1D) direction. For that case, the longest pass available in the Mediterranean Sea (pass 444) has been used in order to utilize as many as possible SLA observations without any interruptions from dry-land areas (islands, isles, etc.). The second test refers to the use of the entire set of ENVISAT passes for the Mediterranean Sea so that the SLA variability will be studied in both the along- and cross-track (2D) direction. Prediction is carried out with LSC in order to evaluate the accuracy that they offer. Three tests are performed, the first one by omitting the first 20 records of the track and using the rest for the prediction, the second by omitting the last 20 points and the third by omitting every second point and using the rest for the prediction. The tests cases are also depicted with the boxes in Fig. 3, where the SLA for August 2005 and the sub-satellite points for pass 444 are displayed.

In the forth chapter, the main results of the study are summarized. Sea level anomaly values at monthly intervals between 2005-2009 are presented and commented, while all the statistical results are pointed out in matrix form. The empirical covariance functions derived for the ENVISAT SLA data along pass 444 for all consecutive months within each year between 2005 and 2009 are presented. Given the 35-day exact repeat period of ENVISAT the collection of monthly SLA empirical covariance functions is not equal to twelve but varies between ten and eleven months for each year. In any case, for each month, only data falling in the specific time period have been used. The chapter continues with the total inverse barometer correction on the raw data of 2008. Additionally, as far as the 2D case is concerned, the empirical covariance functions for all cycles of year 2008 (cycles 65-74) are presented while an inner window was selected for the area bounded between ($32^o \leq \phi \leq 36^o$ and $15^o \leq \lambda \leq 20^o$) is depicted too. The same analysis has been carried out for the DOT model of Rio. Analytical covariance functions for all cases are described and commented. The chapter continues with the calculation of errors prediction with LSC and ends with the investigation of any possible correlations, between the ENVISAT SLA variances for pass 444 for the period between 2005 and 2010 with the SOI, NAO and MOI indexes.

Finally, in chapter five, the main results of the study are summarized and some proposals for future investigations are presented.

Περίληψη

Η μεταπτυχιακή αυτή διατριβή με τίτλο **"Προσδιορισμός αναλυτικών συναρτήσεων συμμεταβλητότητας των ανωμαλιών της επιφάνειας της θάλασσας και της δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας για την στατιστική μελέτη των μεταβολών της στάθμης της θάλασσας"** εκπονήθηκε από το μεταπτυχιακό φοιτητή Νατσιόπουλο Α. Δημήτριο στο πλαίσιο των υποχρεώσεων για την ολοκλήρωση των σπουδών στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών του Τμήματος Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών (ΤΑΤΜ) της Πολυτεχνικής Σχολής του ΑΠΘ στην ειδίκευση της Γεωπληροφορικής στην κατεύθυνση των Σύγχρονων Γεωδαιτικών Εφαρμογών. Στόχος της παρούσης εργασίας είναι ο καθορισμός αναλυτικών συναρτήσεων συμμεταβλητότητας της ανωμαλίας της στάθμης της θάλασσας και της δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας για της μοντελοποίηση των μεταβολών της στάθμης της θάλασσας.

Η μελέτη βασίζεται σε αλτιμετρικά δεδομένα της δορυφορικής αποστολής του Envisat για ολόκληρη τη διάρκεια της αποστολής από το 2002 ως το 2011. Ο υπολογισμός των αναλυτικών συναρτήσεων συμμεταβλητότητας πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας εκθετικά μοντέλα, μοντέλα Gauss-Markov δευτέρου και τρίτου βαθμού καθώς και ενός μοντέλου σφαιρικών αρμονικών. Τα όρια της περιοχής μελέτης είναι ο ευρύτερος χώρος της Μεσογείου με γεωγραφικός πλάτος $30^o \leq \phi \leq 50^o$ και γεωγραφικό μήκος $-10^o \leq \lambda \leq 40^o$. Οι τιμές των ανωμαλιών της στάθμης της θάλασσας αναφέρονται στην επιφάνεια αναφοράς του γεωδυναμικού μοντέλου EGM 2008 ενώ έχουν εφαρμοστεί όλες οι γεωφυσικές διορθώσεις αλλά και οι διορθώσεις που αφορούν το αλτίμετρο.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους λόγους και τους στόχους που επιβάλλουν την εκπόνηση μιας τέτοιας μελέτης στην περιοχή, τα αναμενόμενα αποτελέσματα ενώ παρουσιάζεται και μια σύντομη περιγραφή των περιεχομένων κάθε κεφαλαίου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο ξεκινά με εισαγωγή στην έννοια της δορυφορικής αλτιμετρίας. Παρουσιάζονται οι αλτιμετρικές αποστολές του παρελθόντος, οι εφαρμογές και οι στόχοι της συγκεκριμένης τεχνικής ενώ περιγράφεται αναλυτικά η αλτιμετρική αποστολή του δορυφόρου Envisat. Γίνεται εκτενής αναφορά στις εμπειρικές και αναλυτικές συναρτήσεις συμμεταβλητότητας, στα μοντέλα που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν καθώς και στον αλγόριθμο της πρόγνωσης με τη μέθοδο της σημειακής προσαρμογής.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι δύο τύποι συναρτήσεων που υπολογίστηκαν. Ο ένας αναφέρεται στη χρήση μια δορυφορικής διάβασης και τον υπολογισμό συνάρτησης συμμεταβλητότητας στη μία διάσταση (along track). Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε η δορυφορική διάβαση 444 η οποία διασχίζει τη Μεσόγειο χωρίς να διακόπτεται από κομμάτια ξηράς. Ο δεύτερος αφορά τη χρήση του συνόλου των δεδομένων στο χώρο της Μεσογείου και τον υπολογισμό των αντίστοιχων συναρτήσεων στις δύο διαστάσεις (cross track). Τέλος, παρουσιάζονται και οι τρεις διαφορετικοί έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν μέσω της σημειακής προσαρμογής, την πρόγνωση στα είκοσι πρώτα σημεία της δορυφορικής διάβασης, στα είκοσι τελευταία και τέλος την πρόγνωση ανά ένα σημείο της διάβασης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Παρουσιάζονται οι τιμές της ανωμαλίας της στάθμης της θάλασσας για την περίοδο 2005-2009 καθώς και οι αντίστοιχες εμπειρικές συναρτήσεις συμμεταβλητότητας για το ίδιο χρονικό διάστημα. Εξετάζεται κατά πόσο επηρεάζει τα δεδομένα η εφαρμογή της αντίστροφης βαρομετρικής διόρθωσης ενώ για την περίπτωση των δύο

διαστάσεων δημιουργήθηκαν συναρτήσεις για όλους τους κύκλους τους έτους 2008, για μια περιοχή με γεωγραφικά όρια $32^o \leq \phi \leq 36^o$ and $15^o \leq \lambda \leq 20^o$ και τέλος για ένα μοντέλο δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας. Για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις παρουσιάζονται οι αναλυτικές συναρτήσεις συμμεταβλητότητας και το κεφάλαιο συνεχίζει με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της πρόγνωσης. Τέλος, εξετάζεται πιθανή συσχέτιση μεταξύ των τιμών των μεταβλητοτήτων και των τιμών των μετεωρολογικών δεικτών SOI, NAO και MOI.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται παράθεση των συμπερασμάτων που προκύπτουν την παρούσα εργασία ενώ δίνονται και κάποια χρήσιμα στοιχεία που έχουν σκοπό να προκαλέσουν συζήτηση και να δώσουν ιδέες για μελλοντική έρευνα στο ίδιο αντικείμενο.

Ευχαριστίες

Έχοντας ολοκληρώσει τη διπλωματική μου εργασία, που σηματοδοτεί και το πέρας των μεταπτυχιακών μου σπουδών στο ΑΠΘ, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω ένα σύνολο ανθρώπων που με βοήθησαν όχι μόνο στην εκπόνηση αυτής της μελέτης αλλά και σε όλη την πορεία των μέχρι τώρα σπουδών μου. Θέλω να ευχαριστήσω όλους όσους ήταν κοντά μου και με τη διαρκή υποστήριξη και συμπαράστασή τους να ολοκληρώσω με τον καλύτερο, θέλω να πιστεύω, δυνατό τρόπο αυτή μου την προσπάθεια. Όσο αφορά στο επιστημονικό μέρος της πορείας μου στο ΤΑΤΜ ευχαριστώ θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Γεώργιο Σ. Βέργο.

Ευχαριστώ θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Γεώργιο Σ. Βέργο γιατί μου εμπιστεύτηκε τη συγκεκριμένη μελέτη. Η συνεχής παρακολούθηση, ενθάρρυνση και εποπτεία των εργασιών μου από μέρος του οδήγησε στην ολοκλήρωση της παρούσης εργασίας. Η συνεχής του συμβολή και συμπαράσταση μου έδωσαν αυτοπεποίθηση και με απέτρεψαν από την εγκατάλειψη της προσπάθειας. Για ότι έκανε για μένα, για όλα τα εφόδια και τις γνώσεις που απλόχερα μου προσέφερε θα ήθελα για άλλη μια φορά να τον ευχαριστήσω θερμά.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω και τον καθηγητή Ηλία Ν. Τζιαβό για τη βοήθεια, την υποστήριξη και τις σημαντικές υποδείξεις του κατά τη διάρκεια της έρευνας.

Οφείλω ευχαριστίες και στις συμφοιτήτριες μου Αφροδίτη Κατσαδούρου και Ειρήνη Κολυβάκη με τις οποίες μοιράστηκα το μεγαλύτερο μέρος των μεταπτυχιακών μου σπουδών. Ένα μεγάλο ευχαριστώ και στον Νίκο, στον Χρήστο, στην Βάσω, στη Θοδώρα, στο Στέλιο και τον Χάρη που καθ' όλη τη διάρκεια των δύο αυτών χρόνων ήταν δίπλα μου.

Τέλος, μου είναι αδύνατο να μην ευχαριστήσω τους γονείς μου Αργύρη και Φιλιώ, την αδερφή μου Γεωργία και τους παππούδες μου. Η βοήθεια και η συμπαράσταση τους σε όλη τη μέχρι τώρα ζωή μου και τα εφόδια τα οποία μου έδωσαν με έκαναν ικανό να αντιμετωπίσω όσες δυσκολίες μου παρουσιάζονται. Τους ευχαριστώ για όλα.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε στο Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Η τριμελής εξεταστική επιτροπή είναι:

1. Ηλίας Τζιαβός, Καθηγητής ΑΠΘ, επιβλέπων
2. Γεώργιος Βέργος, Επίκουρος Καθηγητής ΑΠΘ, επιβλέπων
3. Χριστόφορος Κωτσάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΑΠΘ, μέλος τριμελής επιτροπής

Θεσσαλονίκη, Νοέμβριος 2012

Ματσιόπουλος Α. Δημήτριος

Αφιέρωση

Στον ψηλό

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Extended Summary iii

Περίληψη v

Ευχαριστίες vii

Αφιέρωση ix

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ xi

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ xiv

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ xix

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ xx

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ xxi

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΕΛΕΤΗΣ 1

1.1 Εισαγωγή 1

1.2 Αντικείμενο και στόχοι της παρούσας μελέτης 1

1.3 Διάρθρωση και ανάλυση των περιεχομένων της μελέτης 3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο 5

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΩΝ ΩΚΕΑΝΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΟΥΣ 5

2.1 Εισαγωγή 5

2.1.1 Η αρχή της δορυφορικής αλτιμετρίας και ορισμοί 7

2.2 Δορυφορικές αποστολές παρακολούθησης της θάλασσας 9

2.2.1 Από τον GEOSAT στον Jason 2 9

2.2.2 Η δορυφορική αποστολή Envisat 18

2.3 Ανωμαλίες της επιφάνειας της θάλασσας και δυναμική θαλάσσια τοπογραφία 21

2.3.1 Ανωμαλίες της επιφάνειας της θάλασσας 21

2.3.2 Η δυναμική τοπογραφία της επιφάνειας της θάλασσας 22

2.4 Συναρτήσεις συμμεταβλητότητας και σημειακή προσαρμογή 24

2.4.1 Εμπειρικές συναρτήσεις συμμεταβλητότητας και αναλυτικά μοντέλα 25

Εκθετικά μοντέλα *26*

Μοντέλα Gauss-Markov *27*

Μοντέλα πολυωνύμων Legendre *34*

2.4.2 Πρόγνωση με σημειακή προσαρμογή 36
2.5 Διαθέσιμα Δεδομένα 38
2.6 Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα 42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο 43
ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 43
3.1 Εισαγωγή 43
3.2 Διαδικασία προσδιορισμού εμπειρικών συναρτήσεων συμμεταβλητότητας 43
3.2.1 Εμπειρικές συναρτήσεις along-track 44
3.2.2 Εμπειρικές συναρτήσεις cross-track 44
3.3 Προσδιορισμός αναλυτικών συναρτήσεων συμμεταβλητότητας 45
3.3.1 Αναλυτικές συναρτήσεις along track 45
Εκθετικά μοντέλα 47
Μοντέλα Gauss-Markov 48
Μοντέλα σφαιρικών αρμονικών 49
3.3.2 Αναλυτικές συναρτήσεις cross track 49
Εκθετικά μοντέλα 49
Μοντέλα Gauss-Markov 50
3.4 Διαδικασία Πρόγνωσης με σημειακή προσαρμογή 50
3.4.1 Πρόγνωση along track 50
3.4.2 Πρόγνωση cross track 51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο 55
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 55
4.1 Εισαγωγή 55
4.2 Απεικόνιση τιμών SLA για τη δορυφορική διάβαση (pass) 444 55
Τιμές SLA για το 2005 56
Τιμές SLA για το 2006 61
Τιμές SLA για το 2007 67
Τιμές SLA για το 2008 74
Τιμές SLA για το 2009 79
4.3 Εμπειρικές συναρτήσεις along track 85
Εμπειρικές ΣΣ για το 2005 85
Εμπειρικές ΣΣ για το 2006 91
Εμπειρικές ΣΣ για το 2007 96

Εμπειρικές ΣΣ για το 2008 ..... *102*

Εμπειρικές ΣΣ για το 2009 ..... *108*

4.4 Εμπειρική συνάρτηση συμμεταβλητότητας μετά την εφαρμογή της αντίστροφης βαρομετρικής διόρθωσης 115

4.5 Εμπειρικές συναρτήσεις cross track 117

4.6 Εμπειρική Συνάρτηση για το μοντέλο ΣΣΤΕΘ της Rio 125

4.7 Αναλυτικές Συναρτήσεις along-track 129

Εκθετικά μοντέλα *129*

Μοντέλα Gauss-Markov *134*

Μοντέλο σφαιρικών αρμονικών *135*

4.8 Αναλυτικές Συναρτήσεις cross-track 136

Εκθετικά μοντέλα *136*

Μοντέλα Gauss-Markov *141*

Μελέτη αναλυτικών ΣΣ στο παράθυρο δεδομένων *141*

Μοντέλα Gauss-Markov *145*

4.9 Πρόγνωση along track 145

Πρόγνωση στα 20 πρώτα σημεία *146*

Πρόγνωση στα 20 τελευταία σημεία *147*

Πρόγνωση ανά ένα σημείο *148*

4.10 Πρόγνωση cross-track 150

Κύκλος 74 ..... *150*

Παράθυρο δεδομένων *151*

4.11 Συσχέτιση μεταξύ τιμών SLA και τιμών SOI, MOI και NAO 151

4.12 Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα 155

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο 157

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 157

Βιβλιογραφία 162

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 165

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Κλιματικές και θαλάσσιες μεταβολές τα τελευταία 600 εκατομμύρια χρόνια 6
Σχήμα 2.2: Το σφάλμα τροχιάς των δορυφόρων και η ωκεάνια μεταβλητότητα 7
Σχήμα 2.3: Αναπαράσταση των όρων που χρησιμοποιούνται διεθνώς στη δορυφορική αλτιμετρία 9
Σχήμα 2.4: Ο δορυφόρος GEOSAT..... 10
Σχήμα 2.5: Ο δορυφόρος ERS-1..... 11
Σχήμα 2.6: Ο δορυφόρος TOPEX Poseidon 12
Σχήμα 2.7: Ο δορυφόρος GFO..... 13
Σχήμα 2.9: Ο δορυφόρος Cryosat 14
Σχήμα 2.10: Ο δορυφόρος Jason1 και τα όργανα του 15
Σχήμα 2.11: Ο δορυφόρος Jason 2..... 16
Σχήμα 2.12: Ο δορυφόρος Envisat και τα όργανα του 19
Σχήμα 2.13: Εικόνα από το δορυφόρο Envisat όπου φαίνεται ο καπνός από την πυρκαγιά στο Γραμματικό τον Αύγουστο 09 20
Σχήμα 2.14: Η τελευταία εικόνα που μεταδόθηκε από το δορυφόρο Envisat. Η λήψη έγινε από το ASAR του δορυφόρου και απεικονίζει τις Κανάριες Νήσους..... 20
Σχήμα 2.15: Η αρχή της δορυφορικής αλτιμετρίας 21
Σχήμα 2.16: Πρόβλεψη για το εύρος σε cm της κύριας σεληνιακής παλίρροιας στη Μεσόγειο από το μοντέλο CEFMO..... 22
Σχήμα 2.17: Μέση δυναμική τοπογραφία της θάλασσας την περίοδο 1993-1999 από αλτιμετρικά δεδομένα και δεδομένα της αποστολής Grace 24
Σχήμα 2.18: Απεικόνιση των απλών εκθετικών συναρτήσεων 26
Σχήμα 2.19: Το πλέγμα τιμών του δορυφόρου Envisat στη Μεσόγειο Θάλασσα..... 40
Σχήμα 2.20: Το ίχνος της δορυφορικής διάβασης 444 41
Σχήμα 3.1: Η δορυφορική διάβαση 444 τον Αύγουστο του 2005 και οι αντίστοιχες τιμές της SLA (cm) 46
Σχήμα 3.2: Η εμπειρική ΣΣ τον Αύγουστο του 2005..... 48
Σχήμα 3.3: Οι δύο έλεγχοι που έγιναν στην along track περίπτωση TEST A & TEST B 51
Σχήμα 3.4: Το πλέγμα τιμών για τον κύκλο 74..... 52
Σχήμα 3.5: Το πλέγμα τιμών του Envisat, κύκλοι 65-70..... 53
Σχήμα 4.1: Τιμές SLA (cm) τον Ιανουάριο 2005.....56
Σχήμα 4.2: Τιμές SLA (cm) το Φεβρουάριο 2005..... 56
Σχήμα 4.3: Τιμές SLA (cm) το Μάρτιο 2005.....57
Σχήμα 4.4: Τιμές SLA (cm) τον Απρίλιο 2005..... 57
Σχήμα 4.5: Τιμές SLA (cm) το Μάιο 2005.....58
Σχήμα 4.6: Τιμές SLA (cm) τον Αύγουστο 2005.....58
Σχήμα 4.7: Τιμές SLA (cm) το Σεπτέμβριο 2005..... 59
Σχήμα 4.8: Τιμές SLA (cm) τον Οκτώβριο 2005..... 59
Σχήμα 4.9: Τιμές SLA (cm) το Νοέμβριο 2005.....60
Σχήμα 4.10: Τιμές SLA (cm) το Δεκέμβριο 2005..... 60
Σχήμα 4.11: Τιμές SLA (cm) τον Ιανουάριο 2006.....61
Σχήμα 4.12: Τιμές SLA (cm) το Φεβρουάριο 2006..... 61
Σχήμα 4.13: Τιμές SLA (cm) το Μάρτιο 2006.....62
Σχήμα 4.14: Τιμές SLA (cm) το Μάιο 2006..... 62

Σχήμα 4.15: Τιμές SLA (cm) τον Ιούνιο 2006....63
Σχήμα 4.16: Τιμές SLA (cm) τον Ιούλιο 2006.... 63
Σχήμα 4.17: Τιμές SLA (cm) τον Αύγουστο 2006....64
Σχήμα 4.18: Τιμές SLA (cm) το Σεπτέμβριο 2006.... 64
Σχήμα 4.19: Τιμές SLA (cm) τον Οκτώβριο 2006.... 65
Σχήμα 4.20: Τιμές DOT (cm) για το μοντέλο της Rio.... 66
Σχήμα 4.21: Τιμές SLA (cm) τον Ιανουάριο 2007....67
Σχήμα 4.22: Τιμές SLA (cm) το Φεβρουάριο 2007.... 67
Σχήμα 4.23: Τιμές SLA (cm) το Μάρτιο 2007....68
Σχήμα 4.24: Τιμές SLA (cm) τον Απρίλιο 2007.... 68
Σχήμα 4.25: Τιμές SLA (cm) το Μάιο 2007....69
Σχήμα 4.26: Τιμές SLA (cm) τον Ιούνιο 2007.... 69
Σχήμα 4.27: Τιμές SLA (cm) τον Αύγουστο 2007....70
Σχήμα 4.28: Τιμές SLA (cm) το Σεπτέμβριο 2007....70
Σχήμα 4.29: Τιμές SLA (cm) τον Οκτώβριο 2007....71
Σχήμα 4.30: Τιμές SLA (cm) το Νοέμβριο 2007.... 71
Σχήμα 4.31: Τιμές SLA (cm) το Δεκέμβριο 2007.... 72
Σχήμα 4.32: Τιμές του υψομέτρου της ΜΣΘ από τα δεδομένα των αποστολών Jason-1 & Envisat.... 73
Σχήμα 4.33: Τιμές SLA (cm) τον Ιανουάριο 2008....74
Σχήμα 4.34: Τιμές SLA (cm) το Φεβρουάριο 2008.... 74
Σχήμα 4.35: Τιμές SLA (cm) τον Απρίλιο 2008....75
Σχήμα 4.36: Τιμές SLA (cm) τον Ιούνιο 2008.... 75
Σχήμα 4.37: Τιμές SLA (cm) τον Ιούλιο 2008....76
Σχήμα 4.38: Τιμές SLA (cm) τον Αύγουστο 2008.... 76
Σχήμα 4.39: Τιμές SLA (cm) το Σεπτέμβριο 2008....77
Σχήμα 4.40: Τιμές SLA (cm) τον Οκτώβριο 2008.... 77
Σχήμα 4.41: Τιμές SLA (cm) το Νοέμβριο 2008.... 78
Σχήμα 4.42: Τιμές SLA (cm) τον Ιανουάριο 2009....79
Σχήμα 4.43: Τιμές SLA (cm) το Φεβρουάριο 2009.... 79
Σχήμα 4.44: Τιμές SLA (cm) το Μάρτιο 2009....80
Σχήμα 4.45: Τιμές SLA (cm) τον Απρίλιο 2009.... 80
Σχήμα 4.46: Τιμές SLA (cm) το Μάιο 2009....81
Σχήμα 4.47: Τιμές SLA (cm) τον Ιούνιο 2009.... 81
Σχήμα 4.48: Τιμές SLA (cm) τον Ιούλιο 2009....82
Σχήμα 4.49: Τιμές SLA (cm) τον Αύγουστο 2009.... 82
Σχήμα 4.50: Τιμές SLA (cm) το Σεπτέμβριο 2009.... 83
Σχήμα 4.51: Τιμές SLA (cm) τον Οκτώβριο 2009.... 83
Σχήμα 4.52: Τιμές SLA (cm) το Νοέμβριο 2009.... 84
Σχήμα 4.53: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιανουάριο 2005.... 85
Σχήμα 4.54: Η εμπειρική ΣΣ για το Φεβρουάριο 2005 86
Σχήμα 4.55: Η εμπειρική ΣΣ για το Μάρτιο 2005.... 86
Σχήμα 4.56: Η εμπειρική ΣΣ για τον Απρίλιο 2005.... 87
Σχήμα 4.57: Η εμπειρική ΣΣ για το Μάιο 2005 87

Σχήμα 4.58: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιούνιο 2005 88
Σχήμα 4.59: Η εμπειρική ΣΣ για τον Αύγουστο 2005 88
Σχήμα 4.60: Η εμπειρική ΣΣ για το Σεπτέμβριο 2005 89
Σχήμα 4.61: Η εμπειρική ΣΣ για τον Οκτώβριο 2005 89
Σχήμα 4.62: Η εμπειρική ΣΣ για το Νοέμβριο 2005 90
Σχήμα 4.63: Η εμπειρική ΣΣ για το Δεκέμβριο 2005 90
Σχήμα 4.64: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιανουάριο 2006 91
Σχήμα 4.65: Η εμπειρική ΣΣ για το Φεβρουάριο 2006 92
Σχήμα 4.66: Η εμπειρική ΣΣ για το Μάρτιο 2006 92
Σχήμα 4.67: Η εμπειρική ΣΣ για το Μάιο 2006 93
Σχήμα 4.68: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιούνιο 2006 93
Σχήμα 4.69: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιούλιο 2006 94
Σχήμα 4.70: Η εμπειρική ΣΣ για τον Αύγουστο 2006 94
Σχήμα 4.71: Η εμπειρική ΣΣ για το Σεπτέμβριο 2006 95
Σχήμα 4.72: Η εμπειρική ΣΣ για τον Οκτώβριο 2006 95
Σχήμα 4.73: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιανουάριο 2007 96
Σχήμα 4.74: Η εμπειρική ΣΣ για το Φεβρουάριο 2007 97
Σχήμα 4.75: Η εμπειρική ΣΣ για το Μάρτιο 2007 97
Σχήμα 4.76: Η εμπειρική ΣΣ για τον Απρίλιο 2007 98
Σχήμα 4.77: Η εμπειρική ΣΣ για το Μάιο 2007 98
Σχήμα 4.78: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιούνιο 2007 99
Σχήμα 4.79: Η εμπειρική ΣΣ για τον Αύγουστο 2007 99
Σχήμα 4.80: Η εμπειρική ΣΣ για το Σεπτέμβριο 2007 100
Σχήμα 4.81: Η εμπειρική ΣΣ για τον Οκτώβριο 2007 100
Σχήμα 4.82: Η εμπειρική ΣΣ για το Νοέμβριο 2007 101
Σχήμα 4.83: Η εμπειρική ΣΣ για το Δεκέμβριο 2007 101
Σχήμα 4.84: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιανουάριο 2008 102
Σχήμα 4.85: Η εμπειρική ΣΣ για το Φεβρουάριο 2008 103
Σχήμα 4.86: Η εμπειρική ΣΣ για τον Απρίλιο 2008 103
Σχήμα 4.87: Η εμπειρική ΣΣ για το Μάιο 2008 104
Σχήμα 4.88: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιούνιο 2008 104
Σχήμα 4.89: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιούλιο 2008 105
Σχήμα 4.90: Η εμπειρική ΣΣ για τον Αύγουστο 2008 105
Σχήμα 4.91: Η εμπειρική ΣΣ για το Σεπτέμβριο 2008 106
Σχήμα 4.92: Η εμπειρική ΣΣ για τον Οκτώβριο 2008 106
Σχήμα 4.93: Η εμπειρική ΣΣ για το Νοέμβριο 2008 107
Σχήμα 4.94: Τιμές Co (cm^2) 107
Σχήμα 4.95: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιανουάριο 2009 108
Σχήμα 4.96: Η εμπειρική ΣΣ για το Φεβρουάριο 200 109
Σχήμα 4.97: Η εμπειρική ΣΣ για τον Απρίλιο 2009 109
Σχήμα 4.98: Η εμπειρική ΣΣ για το Μάιο 2009 110
Σχήμα 4.99: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιούνιο 2009 110
Σχήμα 4.100: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιούλιο 2009 111

Σχήμα 4.101: Η εμπειρική ΣΣ για τον Αύγουστο 2009 111
Σχήμα 4.102: Η εμπειρική ΣΣ για το Σεπτέμβριο 2009 112
Σχήμα 4.103: Η εμπειρική ΣΣ για τον Οκτώβριο 2009 112
Σχήμα 4.104: Η εμπειρική ΣΣ για το Νοέμβριο 2009 113
Σχήμα 4.105: Εμπειρικές ΣΣ για το 2009 114
Σχήμα 4.106: Τιμές SLA (cm) πριν την εφαρμογή της αντίστροφης βαρομετρικής διόρθωσης 115
Σχήμα 4.107: Τιμές SLA (cm) μετά την εφαρμογή της αντίστροφης βαρομετρικής διόρθωσης..... 116
Σχήμα 4.108: Τιμές εμπειρικής ΣΣ πριν την εφαρμογή της αντίστροφης βαρομετρικής διόρθωσης..... 116
Σχήμα 4.109: Τιμές εμπειρικής ΣΣ μετά την εφαρμογή της αντίστροφης βαρομετρικής διόρθωσης 117
Σχήμα 4.110: Τιμές εμπειρικής ΣΣ για τον κύκλο 68 βήμα 15 km 118
Σχήμα 4.111: Τιμές εμπειρικής ΣΣ για τον κύκλο 69 βήμα 15 km 118
Σχήμα 4.112:Τιμές εμπειρικής ΣΣ για τον κύκλο 65..... 119
Σχήμα 4.113: Τιμές εμπειρικής ΣΣ για τον κύκλο 67..... 120
Σχήμα 4.114: Τιμές εμπειρικής ΣΣ για τον κύκλο 69..... 120
Σχήμα 4.115: Τιμές εμπειρικής ΣΣ για τον κύκλο 71..... 121
Σχήμα 4.116: Τιμές εμπειρικής ΣΣ για τον κύκλο 72..... 121
Σχήμα 4.117: Τιμές εμπειρικής ΣΣ για τον κύκλο 73..... 122
Σχήμα 4.118: Τιμές εμπειρικής ΣΣ για τον κύκλο 74..... 122
Σχήμα 4.119: Τιμές εμπειρικής ΣΣ για τη δορυφορική διάβαση 444 το 2008..... 123
Σχήμα 4.120: Πλέγμα δεδομένων Envisat..... 124
Σχήμα 4.121: Τιμές εμπειρικής ΣΣ για το παράθυρο δεδομένων..... 125
Σχήμα 4.122: Τιμές εμπειρικής ΣΣ rio_med με βήμα 50 km..... 126
Σχήμα 4.123: Τιμές εμπειρικής ΣΣ rio_med με βήμα 70 km..... 126
Σχήμα 4.124: Τιμές εμπειρικής ΣΣ rio_med με βήμα 100 km..... 127
Σχήμα 4.125: Τιμές εμπειρικής ΣΣ rio_med με βήμα 150 km..... 127
Σχήμα 4.126: Τιμές εμπειρικής ΣΣ rio_med με βήμα 200 km..... 128
Σχήμα 4.127: Τιμές εμπειρικής ΣΣ rio_med με βήμα 250 km..... 128
Σχήμα 4.128: Αναλυτική ΣΣ με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi)=\alpha e^{b\psi}$ 130
Σχήμα 4.129: Αναλυτική ΣΣ με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi)=\alpha e^{b\psi}+ce^{d\psi}$ 131
Σχήμα 4.130: Αναλυτική ΣΣ με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi)=\alpha e^{(-(\frac{(\psi-b)}{c})^2)}$ 131
Σχήμα 4.131: Αναλυτική ΣΣ με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi)=\alpha e^{-b\psi^2}$ 132
Σχήμα 4.132: Αναλυτική ΣΣ με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi)=\alpha e^{-b\psi}\cos(\omega\psi)$ 132
Σχήμα 4.133: Αναλυτική ΣΣ με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi)=\alpha(1+b\psi)e^{-b\psi}$ 133
Σχήμα 4.134: Αναλυτικές ΣΣ των Gauss-Markov μοντέλων..... 134
Σχήμα 4.135: Αναλυτική ΣΣ μοντέλου σφαιρικών αρμονικών..... 135
Σχήμα 4.136: Αναλυτική ΣΣ για τον κύκλο 74 με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi)=\alpha e^{b\psi}$ 137
Σχήμα 4.137: Αναλυτική ΣΣ για τον κύκλο 74 με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi)=\alpha e^{b\psi}+ce^{d\psi}$ 138
Σχήμα 4.138: Αναλυτική ΣΣ για τον κύκλο 74 με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi)=\alpha e^{(-(\frac{(\psi-b)}{c})^2)}$ 138
Σχήμα 4.139: Αναλυτική ΣΣ για τον κύκλο 74 με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi)=\alpha e^{-b\psi^2}$ 139

Σχήμα 4.140: Αναλυτική ΣΣ για τον κύκλο 74 με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi) = \alpha e^{-b\psi} \cos(\omega\psi)$ 139
Σχήμα 4.141: Αναλυτική ΣΣ για τον κύκλο 74 με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi) = \alpha(1+b\psi)e^{-b\psi}$ 140
Σχήμα 4.142: Αναλυτική ΣΣ για τον κύκλο 74 με τα μοντέλα Gauss-Markov 141
Σχήμα 4.143:Αναλυτική ΣΣ για το παράθυρο δεδομένων με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi) = \alpha e^{b\psi}$ 142
Σχήμα 4.145: Αναλυτική ΣΣ για το παράθυρο δεδομένων με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi) = \alpha e^{-b\psi} \cos(\omega\psi)$ 143
Σχήμα 4.146: Αναλυτική ΣΣ για το παράθυρο δεδομένων με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi) = \alpha(1+b\psi)e^{-b\psi}$ 143
Σχήμα 4.147:Αναλυτική ΣΣ για το παράθυρο δεδομένων με το μοντέλο Gauss-Markov 145
Σχήμα 4.148: Απεικόνιση των σφαλμάτων πρόγνωσης στα είκοσι πρώτα σημεία..... 147
Σχήμα 4.149: Απεικόνιση των σφαλμάτων πρόγνωσης στα είκοσι τελευταία σημεία 148
Σχήμα 4.150: Απεικόνιση των σφαλμάτων πρόγνωσης ανά ένα σημείο 149
Σχήμα 4.151: Μεταβλητότητα της SLA για το διάστημα 2005-2010 και η συσχέτιση με το SOI..... 152
Σχήμα 4.152: Μεταβλητότητα της SLA για το διάστημα 2005-2010 και η συσχέτιση με το NAO..... 153
Σχήμα 4.153: Μεταβλητότητα της SLA για το διάστημα 2005-2010 και η συσχέτιση με το MOI 154
Σχήμα 4.154: Δείκτες NAO και MOI για το διάστημα 2005-2010 155

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Τα χαρακτηριστικά των αλτιμετρικών δορυφόρων..... 17
Πίνακας 2.2: Τα στατιστικά των τιμών των ανωμαλιών της θάλασσας (SLA) σε cm..... 41
Πίνακας 4.1: Στατιστικά τιμών SLA (cm) για το έτος 2005..... 60
Πίνακας 4.2: Στατιστικά τιμών SLA (cm) για το έτος 2006..... 65
Πίνακας 4.3: Στατιστικά τιμών SLA (cm) για το έτος 2007..... 72
Πίνακας 4.4: Στατιστικά τιμών SLA (cm) για το έτος 2008..... 78
Πίνακας 4.5: Στατιστικά τιμών SLA (cm) για το έτος 2009..... 84
Πίνακας 4.6: Χαρακτηριστικά των εμπειρικών ΣΣ των κύκλων της χρονιάς 2008..... 123
Πίνακας 4.7: Τιμές αγνώστων συντελεστών αναλυτικών εκθετικών μοντέλων για τη διάβαση 444 133
Πίνακας 4.8: Τιμές αγνώστων συντελεστών μοντέλων Gauss-Markov 134
Πίνακας 4.9: Τιμές αγνώστων συντελεστών αναλυτικών εκθετικών μοντέλων για τον κύκλο 74..... 140
Πίνακας 4.10: Τιμές αγνώστων συντελεστών αναλυτικών εκθετικών μοντέλων για το παράθυρο δεδομένων 144
Πίνακας 4.12: Στατιστικά σφαλμάτων πρόγνωσης στα είκοσι πρώτα σημεία (cm) 146
Πίνακας 4.13: Στατιστικά σφαλμάτων πρόγνωσης στα είκοσι τελευταία σημεία (cm)..... 147
Πίνακας 4.14: Στατιστικά σφαλμάτων πρόγνωσης ανά ένα σημείο (cm) 149
Πίνακας 4.15: Στατιστικά σφαλμάτων πρόγνωσης ανά ένα σημείο (cm) 150
Πίνακας 4.16: Στατιστικά σφαλμάτων πρόγνωσης ανά ένα σημείο (cm) 151

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Σύμβολο	**Περιγραφή**
h^{alt}	Απόσταση μεταξύ του δορυφόρου και της Στιγμιαίας Στάθμης της Θάλασσας
s	Τοπογραφία της επιφάνειας της θάλασσας
S_c	Σχεδόν-στάσιμο μέρος της τοπογραφίας της επιφάνειας της θάλασσας
S_t	Μεταβαλλόμενο μέρος της τοπογραφίας της επιφάνειας της θάλασσας
N	Υψόμετρο Γεωειδούς
ξ	Μήκος Συσχέτισης
C_0	Μεταβλητότητα
φ	Γεωδαιτικό πλάτος
λ	Γεωδαιτικό μήκος
$P_n(\cos\theta)$	Πολυώνυμα Legendre
^{T}	Ανάστροφος πίνακα
$^{-1}$	Αντίστροφος πίνακα

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

CNES-Centre National d'Etudes Spatiales

DEOS-Delft Institute for Earth-Oriented Space research

DORIS-Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite

DOT-Dynamic Ocean Topography

ENVISAT-ENVIronmental SATellite

ERS-European Remote Sensing

ESA-European Space Agency

EUMETSAT-European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites

GM-Geodetic Mission

GPS-Global Positioning System

MOI-Mediterranean Oscillation Index

NAO-North Atlantic Oscillation

NASA-National Aeronautics and Space Administration

NOAA-National Oceanic and Atmospheric Administration

SLA-Sea Level Anomaly

SOI-Southern Oscillation Index

SSB-Sea State Bias

SSH-Sea Surface Height

SST-Sea Surface Topography

WGS-World Geodetic System

ΜΣΘ – Μέση Στάθμη Θάλασσας

ΣΕΘ-Στιγμιαία Επιφάνεια της Θάλασσας

ΣΣ-Συνάρτηση Συμμεταβλητότητας

ΣΣΤΕΘ – Σχεδόν Στάσιμη Τοπογραφία της Επιφάνειας της Θάλασσας

ΧΜΤΕΘ – Χρονικά Μεταβαλλόμενη Τοπογραφία της Επιφάνειας της Θάλασσας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΕΛΕΤΗΣ

1.1 Εισαγωγή

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή επιχειρεί τη μελέτη των μεταβολών των ανωμαλιών της θαλάσσιας επιφάνειας από αλτιμετρικά δεδομένα της αποστολής Envisat και της στατιστικής συμπεριφοράς τους. Αρχικά, παρουσιάζεται η αρχή της δορυφορικής αλτιμετρίας και οι όροι της που χρησιμοποιούνται διεθνώς. Γίνεται αναφορά στο σύνολο των δορυφορικών αποστολών του παρελθόντος, περιγράφεται αναλυτικά η δορυφορική αποστολή του Envisat, ενώ παρουσιάζονται οι τύποι των θαλάσσιων μεταβολών. Εκτενής αναφορά γίνεται στους διάφορους τύπους συναρτήσεων συμμεταβλητότητας και στους αλγόριθμους πρόγνωσης διαφόρων παραμέτρων. Αφού περιγραφούν τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, παρουσιάζονται αναλυτικά τα προγράμματα και οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν για τον υπολογισμό εμπειρικών και αναλυτικών συναρτήσεων συμμεταβλητότητας και την πρόγνωση τιμών. Τέλος, εμφανίζονται όλα τα αποτελέσματα που αφορούν τις μεταβολές της ανωμαλίας της στάθμης της θάλασσας, εξετάζεται πιθανή συσχέτιση των μεταβολών με διάφορα μετεωρολογικά και κλιματικά φαινόμενα, παρουσιάζονται οι εμπειρικές και αναλυτικές συναρτήσεις συμμεταβλητότητας που υπολογίστηκαν και τα αποτελέσματα των διάφορων περιπτώσεων πρόγνωσης. Η λογική στην οποία βασίζεται η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή είναι η μετάβαση από το γενικό στο ειδικό, από τις βασικές θεωρητικές εισαγωγικές έννοιες και τα διαθέσιμα δεδομένα, στην επεξεργασία αυτών και τα αποτελέσματα. Στόχος είναι η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων που αφορούν τη στατιστική συμπεριφορά των θαλάσσιων μεταβολών και την πιθανή χρήση αυτής για την πρόγνωση διαφόρων παραμέτρων μέσω της σημειακής προσαρμογής ή άλλων διαδικασιών πρόγνωσης.

1.2 Αντικείμενο και στόχοι της παρούσας μελέτης

Η παρακολούθηση και κατανόηση της μεταβολής της στάθμης της θάλασσας σε διάφορες χωρικές και χρονικές κλίμακες αποτέλεσε το αντικείμενο πολλών μελετών τις τελευταίες δεκαετίες. Οι μεταβολές αυτές οφείλονται σε ένα σύνολο παραγόντων που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα Γη. Αυτές οι φυσικές διεργασίες πηγάζουν από τις μεταβολές των ιδιοτήτων του θαλάσσιου νερού και από τη μεταφορά υδρολογικών μαζών μεταξύ των ωκεανών, των ηπείρων και της ατμόσφαιρας. Τόσο οι ευστατικές (eustatic) όσο και οι μη ευστατικές μεταβολές (steric) της θαλάσσιας επιφάνειας καθώς και η μοντελοποίηση τους διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο όχι μόνο στις ωκεανογραφικές αλλά και στις γεωδαιτικές εφαρμογές (Νατσιόπουλος, 2010). Οι πρώτες οφείλονται σε μεταβολές στην αλατότητα και τη θερμοκρασία ενώ οι δεύτερες στις απορροές των ποταμών, στις μεταβολές της μάζας των πάγων και της περιεκτικότητας της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς. Η κατάλληλη μοντελοποίησή τους για το συνδυασμό δεδομένων και τη μετάδοση σφαλμάτων είναι απαραίτητη για το καθορισμό της δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας και του

γεωειδούς. Το γεγονός αυτό απέκτησε μεγαλύτερη σημασία την τελευταία δεκαετία με τα πλεονεκτήματα που παρέχουν οι δορυφορικές αποστολές για τη μελέτη του πεδίου βαρύτητας (GRACE και GOCE) που επιτρέπουν το συνδυασμό παραμέτρων του πεδίου βαρύτητας με αλτιμετρικές παρατηρήσεις για τη μελέτη των ωκεανών.

Από τις αρχές της δεκαετίας του 80, η χρήση αλτιμέτρων στους δορυφόρους είχε ως αποτέλεσμα τη διάθεση υψών της στάθμης της θάλασσας σε παγκόσμια κλίμακα με ενιαία ακρίβεια και ανάλυση. Η δορυφορική αλτιμετρία και το πλήθος των παρατηρήσεων που παρέχει με υψηλή ακρίβεια και ανάλυση, εξυπηρετούν στον ακριβή καθορισμό των μεταβολών της στάθμης της θάλασσας χωρίς τους περιορισμούς των επίγειων παρατηρήσεων. Η εικοσαετής πλέον καταγραφή παρατηρήσεων για τη στάθμη της θάλασσας σε συνδυασμό με παρατηρήσεις των δορυφόρων GRACE και GOCE προσφέρουν νέες δυνατότητες για την εκτίμηση των τάσεων των μεταβολών σε τοπικές και παγκόσμιες κλίμακες και τον καθορισμό εποχιακών σημάτων (Vergos et al., 2012,a). Αν και σε παρόμοιες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν, ο συνδυασμός δεδομένων και η επεξεργασία τους διεξήχθη προσεκτικά και με τους κατάλληλους ελέγχους, δε δόθηκε η ανάλογη προσοχή στη μετάδοση των σφαλμάτων μέσα από αναλυτικούς πίνακες μεταβλητοτήτων-συμμεταβλητοτήτων των δεδομένων. Πρόσφατα παραδείγματα τέτοιων μελετών πραγματοποιήθηκαν για τον καθορισμό της δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας για τις περιοχές μεταξύ Γροιλανδίας και Ηνωμένου Βασιλείου (Knudsen et al., 2004). Η μοντελοποίηση του σήματος και των χαρακτηριστικών των σφαλμάτων παίζουν σημαντικό ρόλο στο συνδυασμό ετερογενών δεδομένων, καθώς η μετάδοση των σφαλμάτων μπορεί να δώσει αξιόπιστες εκτιμήσεις των σφαλμάτων του εξαγόμενου σήματος. Αυτό είναι αναγκαίο σε αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται στη φυσική γεωδαισία, όπως π.χ. η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων, όπου οι πίνακες μεταβλητοτήτων-συμμεταβλητοτήτων των δεδομένων είναι απαραίτητοι για την πρόγνωση σημάτων.

Όταν στόχος είναι ο καθορισμός των μεταβολών της θαλάσσιας στάθμης ή της δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας από συνδυασμό αλτιμετρικών δεδομένων και παρατηρήσεων των δορυφόρων GRACE/GOCE, είναι απαραίτητο να προσδιορισθούν αναλυτικές συναρτήσεις συμμεταβλητότητας για το διαταρακτικό δυναμικό και τις παραγώγους δεύτερης τάξης, όπως επίσης και για τα υψόμετρα του γεωειδούς (Vergos et al., 2012,b). Αντίθετα, ούτε τοπικά ούτε παγκόσμια μοντέλα είναι διαθέσιμα για τις αλτιμετρικές παρατηρήσεις των ανωμαλιών της θαλάσσιας επιφάνειας, καθιστώντας έτσι προβληματική τη χρήση τους σε ανάλογους αλγορίθμους. Η παρούσα εργασία εστιάζεται στην κατάλληλη μοντελοποίηση των διαθέσιμων τιμών της ανωμαλίας της στάθμης της θάλασσας (Sea Level Anomaly) προκειμένου να καθοριστούν εμπειρικές και αναλυτικές συναρτήσεις συμμεταβλητότητας (ΣΣ) που θα χρησιμοποιηθούν ακολούθως για την πρόγνωση μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων. Από τις αναλυτικές συναρτήσεις θα προκύψουν οι αντίστοιχοι πίνακες συμμεταβλητοτήτων των δεδομένων. Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εστιάζει στα δεδομένα της αποστολής του Envisat στην περιοχή της Μεσογείου για τη συνολική διάρκεια της αποστολής (2002-2011). Αναλύθηκαν τόσο η περίπτωση της μίας διάστασης (along-track, 1D) όσο και η αντίστοιχη των δύο διαστάσεων (cross-track, 2D), ερμηνεύοντας τα αντίστοιχα αποτελέσματα και χαρακτηριστικά των συναρτήσεων συμμεταβλητότητας. Τα χαρακτηριστικά του σήματος της SLA μελετήθηκαν σε μηνιαίες, εποχικές και ετήσιες κλίμακες. Η εκτίμηση των αναλυτικών συναρτήσεων συμμεταβλητότητας, έγινε χρησιμοποιώντας απλά εκθετικά μοντέλα, τα μοντέλα δεύτερης και τρίτης τάξης των Gauss-Markov και τέλος ένα μοντέλο συντελεστών σφαιρικών αρμονικών συναρτήσεων. Βάση των συναρτήσεων αυτών προχωρήσαμε σε μεθόδους πρόγνωσης τιμών ενώ

συμπεράσματα για τη μεταβλητότητα και το μήκος συσχέτισης καθώς και την ετήσια μεταβλητότητα της SLA πρόκειται να αναλυθούν.

1.3 Διάρθρωση και ανάλυση των περιεχομένων της μελέτης

Στην παρούσα εργασία γίνεται μία προσπάθεια συνολικής παρουσίασης των μεταβολών της ανωμαλίας της θαλάσσιας επιφάνειας, της στατιστικής της συμπεριφοράς και των στατιστικών χαρακτηριστικών της. Η δομή της διατριβής είναι η ακόλουθη:

Στο πρώτο εισαγωγικό κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο αντικείμενο και στους στόχους της παρούσης μεταπτυχιακής διατριβής ενώ το κεφάλαιο κλείνει με την αναλυτική παρουσίαση των περιεχομένων της μελέτης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση των δεδομένων και τεχνικών που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή. Γίνεται αναφορά στις αρχές της δορυφορικής αλτιμετρίας και τους όρους της οι οποίοι χρησιμοποιούνται διεθνώς. Το κεφάλαιο συνεχίζει με περιγραφή των δορυφορικών αποστολών παρακολούθησης της θάλασσας, ενώ αναλυτικότερα περιγράφεται η δορυφορική αποστολή του Envisat. Οι ανωμαλίες της επιφάνειας της θάλασσας και η δυναμική θαλάσσια τοπογραφία ακολουθούν για να περάσουμε στη συνέχεια στην εκτενή αναφορά της εμπειρικής συνάρτησης συμμεταβλητότητας και τους διάφορους τύπους μοντέλων που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των αναλυτικών συναρτήσεων. Το κεφάλαιο κλείνει με την περιγραφή του αλγορίθμου της πρόγνωσης μέσω της σημειακής προσαρμογής και των διαθέσιμων δεδομένων για την παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η προεπεξεργασία των δεδομένων. Οι βασικές εξισώσεις, τα προγράμματα και οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν για τον προσδιορισμό εμπειρικών ΣΣ παρουσιάζονται αναλυτικά τόσο για την περίπτωση επί (κατά μήκος) του δορυφορικού ίχνους (along-track) όσο και για την εγκάρσια κατεύθυνση προς το δορυφορικό ίχνος (cross-track). Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην περιγραφή και την ανάπτυξη των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των αναλυτικών συναρτήσεων στις δύο περιπτώσεις. Παρουσιάζεται η λογική των μοντέλων και η απόδειξη των τελικών σχέσεων. Τέλος, παρουσιάζονται οι τύποι που χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο της σημειακής προσαρμογής.

Το τέταρτο και εκτενέστερο κεφάλαιο ασχολείται με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Αρχικά δίνονται οι μεταβολές της SLA για όλους τους μήνες των ετών 2005-2009 για τη διάβαση (cycle) 444 του δορυφόρου Envisat. Εξετάζεται πιθανή μεταβολή των τιμών της SLA μετά από την εφαρμογή της αντίστροφης βαρομετρικής διόρθωσης τόσο σε επίπεδο τιμών της SLA όσο και ως προς τη συνάρτηση συμμεταβλητότητας. Για την along track περίπτωση υπολογίστηκαν και παρουσιάζονται εμπειρικές ΣΣ για τη διάβαση 444 για όλους τους μήνες των ετών 2005-2009. Αντίστοιχα, για την cross-track περίπτωση, υπολογίστηκαν εμπειρικές ΣΣ για όλους τους κύκλους ενός έτους (2008) καθώς και για ένα παράθυρο δεδομένων που δημιουργήθηκε με συγκεκριμένα γεωγραφικά όρια. Ως cross track ΣΣ, μπορεί να θεωρηθεί και η εμπειρική ΣΣ που υπολογίστηκε για το μοντέλο της δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας της Rio (Rio et

al.,2007). Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με τις αναλυτικές ΣΣ. Για την καλύτερη κατανόηση και τον περιορισμό της έκτασης των αποτελεσμάτων επιλέχθηκε μια συγκεκριμένη διάβαση του δορυφόρου Envisat, για την εμπειρική συνάρτηση του οποίου δημιουργήθηκαν αναλυτικές ΣΣ με έξι εκθετικά μοντέλα, δύο μοντέλα Gauss-Markov και ένα μοντέλο σφαιρικών αρμονικών. Για την cross-track περίπτωση, επιλέξαμε τη συνάρτηση ενός κύκλου (74) για την οποία δημιουργήσαμε αναλυτικές συναρτήσεις με όλα τα προαναφερθέντα μοντέλα πλην αυτού των σφαιρικών αρμονικών. Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε και για την περίπτωση του παράθυρου δεδομένων. Μετά την παρουσίαση των αναλυτικών ΣΣ το κεφάλαιο συνεχίζει με την παράθεση των αποτελεσμάτων της πρόγνωσης. Εξετάστηκαν τρεις περιπτώσεις για την along track περίπτωση και μια για την cross-track. Το κεφάλαιο κλείνει με την εξέταση πιθανής συσχέτισης των μεταβολών των μεταβλητοτήτων της SLA και τιμών διαφόρων μετεωρολογικών δεικτών.

Τέλος, το πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα της διατριβής, όπως προκύπτουν από την ανάλυση που έγινε στα προηγούμενα κεφάλαια. Επιπλέον, στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται ιδέες και προτάσεις για μελλοντική έρευνα και μελέτη στο συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΩΝ ΩΚΕΑΝΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΟΥΣ

2.1 Εισαγωγή

Με την κατάκτηση του διαστήματος, ο άνθρωπος διεύρυνε τους ορίζοντες του, ξέφυγε από τα στενά όρια της γης και διαπίστωσε ότι ένα νέο πεδίο έρευνας και εφαρμογών ανοιγόταν μπροστά του. με την έλευση της διαστημικής εποχής που αποτέλεσε το έναυσμα για την έρευνα, μεταξύ των άλλων, των ωκεανών και της υδρόσφαιρας γενικότερα.

Η μελέτη του υγρού στοιχείου έγινε δυνατή με την επινόηση μιας νέας διαστημικής τεχνολογίας, της δορυφορικής αλτιμετρίας. Σκοπός της δορυφορικής αλτιμετρίας είναι η παρατήρηση των ιδιοτήτων του θαλάσσιου περιβάλλοντος, ώστε με την αξιοποίηση των δεδομένων που προκύπτουν να παρατηρηθούν και να μελετηθούν φαινόμενα όπως η μέση στάθμη της θάλασσας, οι μετακινήσεις των πάγων, το ύψος των κυμάτων, η ταχύτητα των ανέμων, η αλατότητα των ωκεανών, κ.λπ. Το πεδίο εφαρμογών δεν σταματά εδώ καθώς έμμεσα, μέσω ειδικών τεχνικών, αποκτούμε γνώση για το πεδίο βαρύτητας και το φαινόμενο των παλιρροιών.

Η απόκτηση γνώσεων για φαινόμενα που σχετίζονται με τη γεωδαισία (πεδίο βαρύτητας, τοπογραφία της θάλασσας, κ.λπ.) είναι εφικτή μετά από κατάλληλη επεξεργασία τέτοιου είδους παρατηρήσεων. Οι παρατηρήσεις αυτές αναφέρονται στις ωκεάνιες εκτάσεις, σε περιοχές που μερικά χρόνια πριν ήταν δυνατή η γνώση τέτοιων παραμέτρων μόνο μέσω μετρήσεων βαρύτητας στη θάλασσα, μετρήσεων αρκετά δαπανηρών, χρονοβόρων και περιορισμένης ακρίβειας σε σύγκριση πάντοτε με τα δεδομένα που προσφέρει σήμερα η δορυφορική αλτιμετρία (Νατσιόπουλος, 2010).

Η στάθμη της θάλασσας όχι μόνο δεν είναι σταθερή, αλλά αντίθετα μεταβάλλεται συνεχώς. Οι αιτίες για τις ανοδικές ή καθοδικές κινήσεις της στάθμης της θάλασσας μπορεί να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- μηχανισμούς που επηρεάζουν σε παγκόσμια κλίμακα τη στάθμη της θάλασσας (eustatic)
- μηχανισμούς που επηρεάζουν τη στάθμη της θάλασσας τοπικά (steric)

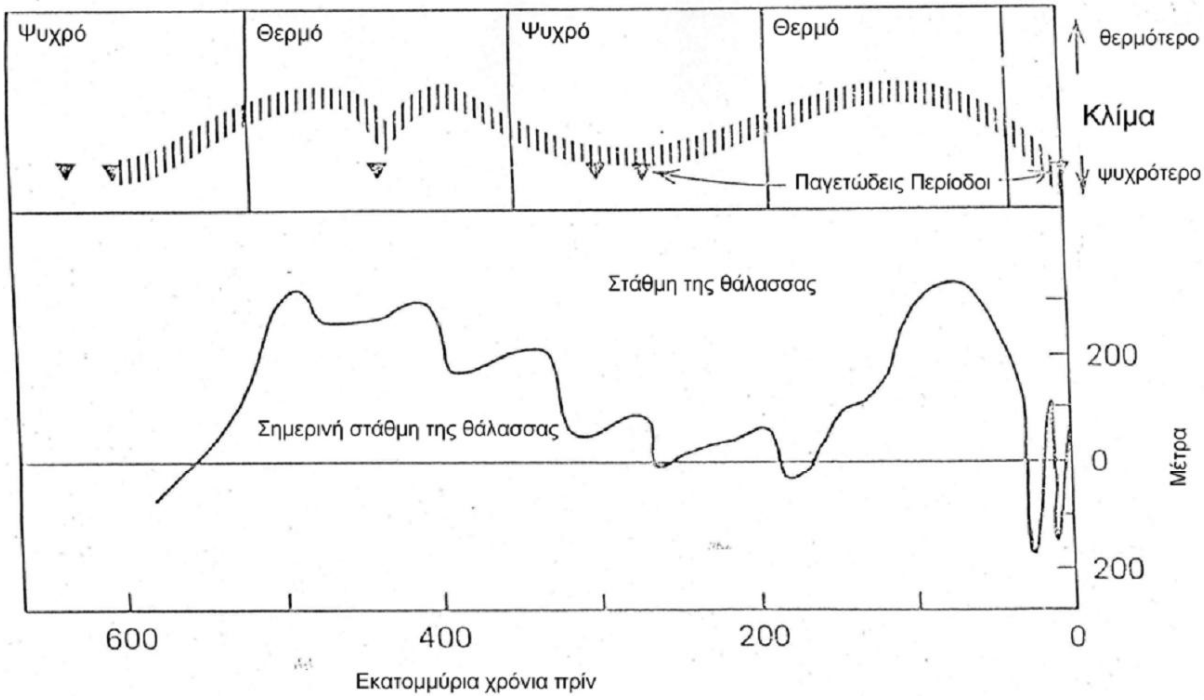
Αντιστοίχως, οι δύο παραπάνω κατηγορίες μπορούν να χωριστούν σε επιμέρους. Ειδικότερα, οι μηχανισμοί που επηρεάζουν τη στάθμη της θάλασσας σε παγκόσμια κλίμακα μπορεί να οφείλονται σε διάφορες αιτίες:

- κλιματικές, που αφορούν την τήξη και πήξη των πάγων και παγετώνων
- τεκτονικές, που οφείλονται στη μεταβολή της χωρητικότητας των ωκεάνιων λεκανών και συνδέονται με την θεωρία των πλακών
- ιζηματολογικές, που οφείλονται στην αργή πλήρωση των ωκεάνιων λεκανών με ιζήματα (περίπου 3mm/ 100 έτη)

- μεταβολές στην πυκνότητα του νερού, που μεταβάλουν τον όγκο του (άνοδος της θερμοκρασίας κατά 1° C θα ανυψώσει μακροπρόθεσμα τη στάθμη της θάλασσας περίπου κατά δύο μέτρα)

Οι τοπικές μεταβολές οφείλονται σε παράγοντες όπως:

- ισοστατικές κινήσεις, δηλαδή επαναφορά της χέρσου σε προηγούμενα ύψη με την υποχώρηση των παγετώνων ή των θαλάσσιων υδάτων στις ωκεάνιες λεκάνες
- τοπικές τεκτονικές κινήσεις, δηλαδή ανοδικές ή καθοδικές κινήσεις τεκτονικών σχηματισμών



Σχήμα 2.1: Κλιματικές και θαλάσσιες μεταβολές τα τελευταία 600 εκατομμύρια χρόνια (www.speleogicalsociety.gr)

Οι μεταβολές της στάθμης της θάλασσας μπορεί να χωριστούν και σε άλλες κατηγορίες. Διακρίνονται σε περιοδικές και μη περιοδικές. Οι περιοδικές μεταβολές διακρίνονται σε κυματισμούς (υψηλές συχνότητες), σε μέσες περιοδικές μεταβολές - αστρονομική παλιρροιακή συνιστώσα - που οφείλονται στην έλξη του ήλιου και της σελήνης σε συνδυασμό με την αντίστοιχη παραμόρφωση του στερεού φλοιού της γης, αλλά και της υδροδυναμικής επίδρασης λόγω του ανάγλυφου του βυθού (ημερήσιες και ημι-ημερήσιες περίοδοι). Ακόμη, υπάρχουν μεταβολές μεγάλης περιόδου που οφείλουν την ύπαρξή τους σε ηλιακές δράσεις. Οι μη περιοδικές μεταβολές οφείλονται κυρίως στην επίδραση μετεωρολογικών φαινομένων αλλά και ευστατικές (eustatic) μεταβολές (τήξη παγετώνων) ή μεταβολές λόγω τεκτονικών δράσεων (Τσαμπουράκη-Κραουνάκη, 2008-Βέργος, 2000).

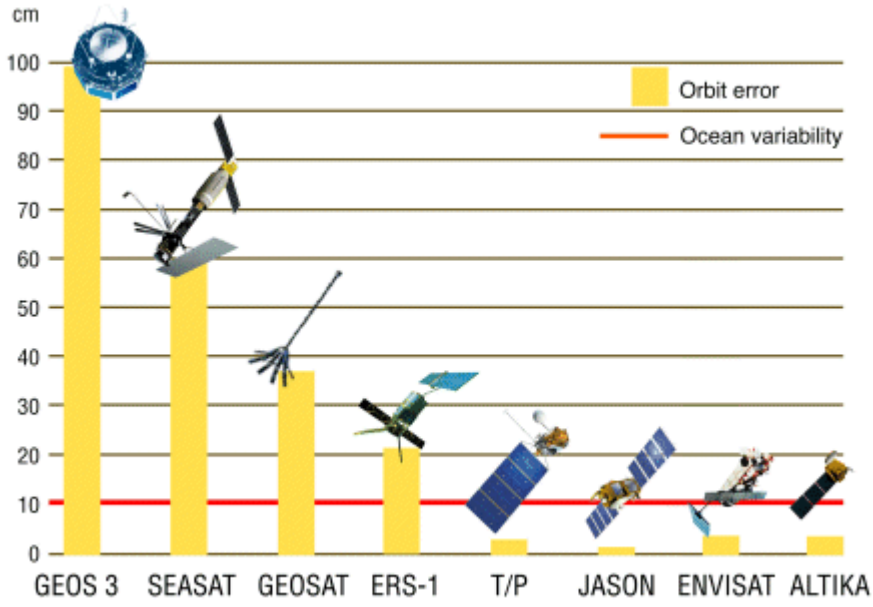
Βέβαια, ιδιαίτερο ενδιαφέρον υπάρχει και για την ανάλυση των δεδομένων που προκύπτουν από τη δορυφορική αλτιμετρία. Οι μέθοδοι ανάλυσης που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι κατανοητές σε βάθος, έτσι ώστε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να είναι δυνατόν να ερμηνευτούν να χρησιμοποιηθούν σωστά. Μια μέθοδος ανάλυσης που χρησιμοποιείται ευρύτατα είναι η στατιστική. Η στατιστική προσπαθεί να ερμηνεύσει φαινόμενα του πραγματικού κόσμου που εμπεριέχουν

μεταβλητότητα και αβεβαιότητα. Εφαρμόζει μεθόδους συλλογής, οργάνωσης και ανάλυσης αριθμητικών κατά βάση δεδομένων και χρησιμοποιείται σε όλους τους κλάδους της επιστήμης.

Ένας από τους πολλούς σκοπούς της ανάλυσης δεδομένων, ίσως ο τελευταίος αλλά όχι ο λιγότερο σημαντικός είναι η πρόγνωση τιμών. Δεν είναι τυχαίες εξάλλου οι απόψεις πολλών μεγάλων επιστημόνων σχετικά με την πρόγνωση: "*Η πρόγνωση είναι δύσκολη, ιδίως όταν αναφέρεται στο μέλλον*" (Mark Twain/Nils Bohr-Αμερικανός συγγραφέας/Δανός φυσικός), "*Είναι πολύ καλύτερο να προβλέπει κανείς χωρίς βεβαιότητα από το να μην προβλέπει καθόλου*" (Henri Poincare/Γάλλος μαθηματικός). Αν οι τιμές της πρόγνωσης ικανοποιούν κάποια πρακτικά αλλά και θεωρητικά κριτήρια τότε η ανάλυση δεδομένων είναι επιτυχής. Σε αντίθεση περίπτωση είναι απαραίτητη η επανεξέταση όλων των σταδίων της ανάλυσης. (Τζιραλής, 2006)

2.1.1 Η αρχή της δορυφορικής αλτιμετρίας και ορισμοί

Η αλτιμετρία ανακοινώθηκε ως πρωταρχικός σκοπός στο συμπόσιο της NASA στο Williamstown το 1969. Η πρώτη από τις τέσσερις βασικές αρχές-προτάσεις του συμποσίου ήταν η δημιουργία δορυφόρων των οποίων το αλτίμετρο θα πραγματοποιούσε μετρήσεις με ακρίβεια δέκα εκατοστών. Με αυτό τον τρόπο η μέση στάθμη της θάλασσας και το γεωδυναμικό της Γης θα προσδιοριστούν με επαρκή ακρίβεια έτσι ώστε να καθοριστεί η παγκόσμια ωκεάνια κυκλοφορία. Τη δεκαετία του ‘70 παρουσιάστηκε μεγάλη εξέλιξη στα ακριβή δορυφορικά αλτιμετρικά συστήματα με το δορυφόρο Skylab, ο οποίος τροφοδότησε την επιστημονική κοινότητα με τις πρώτες μετρήσεις των μεταβολών του θαλασσίου γεωειδούς και τους δορυφόρους GEOS-3 και Seasat των οποίων τα δεδομένα διανέμονταν δωρεάν σε ένα ευρύ φάσμα επιστημόνων παγκοσμίως βάζοντας τις βάσεις για μία νέα γενιά ωκεάνιων δορυφόρων (NASA, 1970).

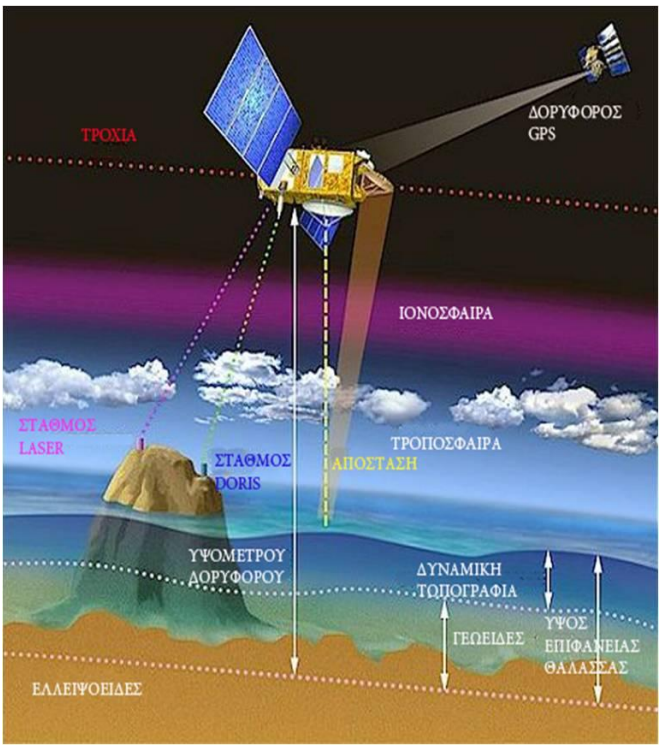


Σχήμα 2.2: Το σφάλμα τροχιάς των δορυφόρων και η ωκεάνια μεταβλητότητα (http://www.altimetry.info)

Από το Σχήμα (2.2) είναι εμφανής η βελτίωση που σημειώθηκε στην ακρίβεια των μετρήσεων καθώς το σφάλμα τροχιάς των δορυφόρων, το οποίο επηρεάζει κυρίως την ακρίβεια των αλτιμετρικών μετρήσεων, έχει μειωθεί περίπου κατά ένα μέτρο τις τελευταίες δεκαετίες. Είναι εμφανές, πως αν και ο GEOS-3 είχε σφάλμα τροχιάς περίπου 1m, στις πιο πρόσφατες αποστολές, π.χ. JASON, ENVISAT, το σφάλμα αυτό έχει περιοριστεί σε μερικά εκατοστά.

Η δορυφορική αλτιμετρία αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο στα χέρια των επιστημόνων και είναι μία από τις σύγχρονες γεωδαιτικές τεχνικές για τη συνεχή παρακολούθηση των μεταβολών της μέσης στάθμης της θάλασσας (ΜΣΘ). Το αλτίμετρο ενός δορυφόρου μετρά τον χρόνο που χρειάζεται ένα παλμικό κύμα που εκπέμπεται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση προς την επιφάνεια της γης για την ολοκλήρωση της διαδρομής κεραία αλτιμέτρου - επιφάνεια της θάλασσας - δέκτης αλτιμέτρου. Οι μετρήσεις του αλτιμέτρου συνδυασμένες με δεδομένα για την ακριβή θέση του δορυφόρου, παράγουν υψόμετρα γεωειδούς για τις θαλάσσιες περιοχές. Ας δούμε αναλυτικότερα τους όρους και τους ορισμούς που χρησιμοποιούνται διεθνώς στη δορυφορική αλτιμετρία. Ως απόσταση (range), η μέτρηση που μας δίνει το αλτίμετρο, ορίζεται η απόσταση από το κέντρο μάζας του δορυφόρου (mass centre of the satellite) μέχρι τη στιγμιαία επιφάνεια της θάλασσας (instantaneous sea surface). Ως υψόμετρο του δορυφόρου (altitude), ορίζεται η απόσταση του κέντρου μάζας του από το ελλειψοειδές αναφοράς (π.χ GRS80, WGS84) κατά τη διεύθυνση της καθέτου. Εξαρτάται από διάφορους παράγοντες (π.χ. την κλίση η οποία δίνει το υψηλότερο γεωγραφικό πλάτος στο οποίο ο δορυφόρος μπορεί να πάρει τις μετρήσεις, την ατμοσφαιρική έλξη, τις δυνάμεις βαρύτητας που ενεργούν στο δορυφόρο, την περιοχή του κόσμου που χαρτογραφείται κ.λπ.). Ο δορυφόρος μπορεί να ακολουθηθεί με διάφορους τρόπους ώστε να μετρηθεί το ύψος του με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια και να καθοριστεί έτσι η ακριβής τροχιά του. Τα συστήματα που συμβάλλουν στον προσδιορισμό της τροχιάς του είναι τα επίγεια συστήματα παρακολούθησης DORIS και SLR καθώς και το δορυφορικό σύστημα GPS. Έτσι, οι αλτιμετρικοί δορυφόροι είναι εφοδιασμένοι με τους κατάλληλους δέκτες για τα συστήματα GPS και DORIS και τους απαραίτητους ανακλαστήρες για το σύστημα SLR. Το ύψος της επιφάνειας της θάλασσας (Sea Surface Height, SSH), είναι η απόσταση του δορυφόρου σε μια δεδομένη στιγμή από την επιφάνεια της θάλασσας (Εξ. 2.1),(Νατσιόπουλος, 2010).

ύψος=υψόμετρο_δορυφόρυ-διορθ_απόσταση (2.1)



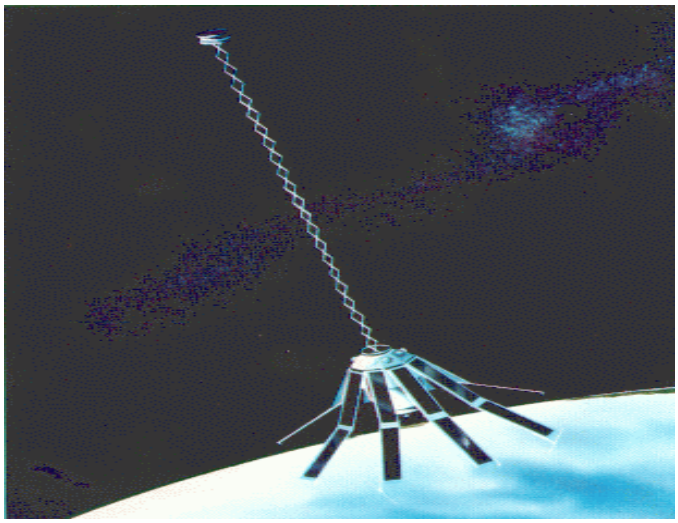
Σχήμα 2.3: Αναπαράσταση των όρων που χρησιμοποιούνται διεθνώς στη δορυφορική αλτιμετρία (Σχήμα από AVISO)

2.2 Δορυφορικές αποστολές παρακολούθησης της θάλασσας

Στη συνέχεια περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά για το σύνολο των δορυφορικών αλτιμετρικών αποστολών από τον GEOSAT κει μετά, ενώ ιδιαίτερη αναφορά θα γίνει στον αλτιμετρικό δορυφόρο Envisat, τα δεδομένα του οποίου χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

2.2.1 Από τον GEOSAT στον Jason 2

Ο αλτιμετρικός δορυφόρος GEOSAT ήταν ο πρώτος που παρείχε υψηλής ποιότητας παγκόσμια δεδομένα. Ο GEOSAT κατασκευάστηκε από το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πανεπιστημίου Johns Hopkins των ΗΠΑ, υπό την εποπτεία του Ναυτικού του ίδιου κράτους. Εκτοξεύτηκε στις 12 Μαρτίου 1985 και ολοκλήρωσε την αποστολή του 5 χρόνια αργότερα, τον Ιανουάριο του 1990. Ο δορυφόρος έφερε ένα αλτίμετρο το οποίο μετρούσε τη στιγμιαία επιφάνεια της θάλασσας με μια ακρίβεια της τάξης των 5 cm ενώ είχε επίσης την ικανότητα να καταγράφει το ύψος των κυμάτων και την ταχύτητα των ανέμων. Εκτέλεσε δύο φάσεις μετρήσεων, την γεωδαιτική φάση (Geodetic Mission-GM) και την ακριβώς επαναλαμβανόμενη (Exact Repeat Mission-ERM) φάση. Η γεωδαιτική φάση διήρκησε 1.5 χρόνο (από τις 30 Μαρτίου 1985 ως και τις 30 Σεπτεμβρίου 1990), το ύψος πτήσης ήταν 800 km και η κλίση πλησίαζε τις 108°. Η τροχιά του δορυφόρου ήταν σχεδόν επαναληπτική με περίοδο 23 ημερών και τα ίχνη των διαφόρων περιστροφών στην επιφάνεια της Γης είχαν απόσταση 4km.

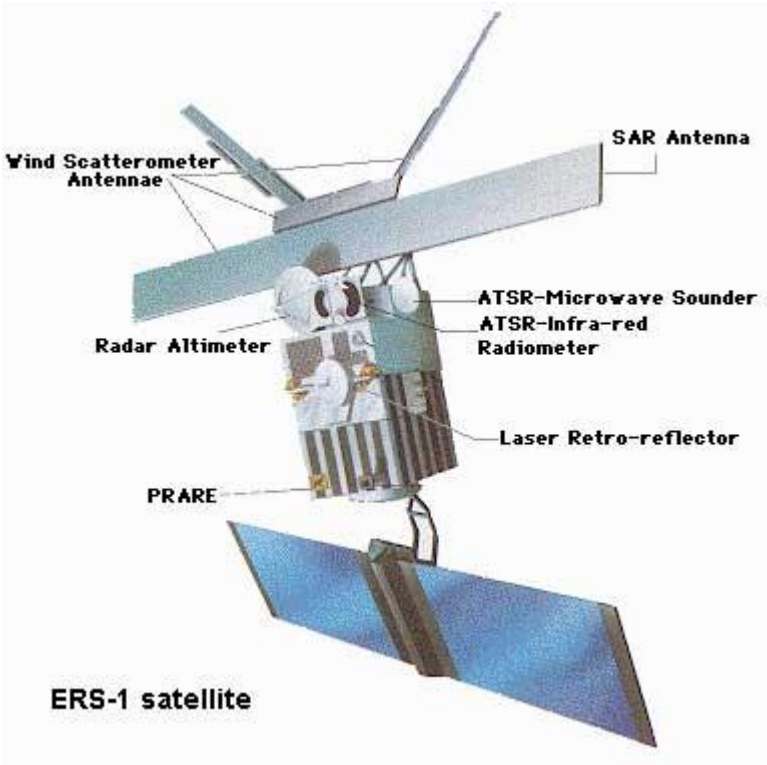


Σχήμα 2.4: Ο δορυφόρος GEOSAT (Σχήμα από www.grdl.noaa.gov)

Μετά το τέλος της γεωδαιτικής φάσης ακολούθησε η ακριβώς επαναλαμβανόμενη, η οποία κατέστη δυνατή με μια αλλαγή στην τροχιά και ξεκίνησε στις 8 Νοεμβρίου 1986. Σε αυτήν τη τροχιά ο δορυφόρος περνά από το ίδιο σημείο στη Γη κάθε 17.05 ημέρες, προσφέροντας έτσι τη δυνατότητα να καθοριστεί η μέση στάθμη θάλασσας σε αυτά τα σημεία, που περιέχουν πληροφορίες για την τοπική βαρύτητα και την ωκεάνια μεταβλητότητα, αλλά και να μελετηθεί η μεταβλητότητα των θαλασσών. Μετά το τέλος της αποστολής εξαιτίας της καταστροφής και των δύο ταινιών καταγραφής που υπήρχαν στο σκάφος, περισσότερα από τρία χρόνια αλτιμετρικών δεδομένων υψηλής ακρίβειας ήταν διαθέσιμα στην επιστημονική κοινότητα. Οι μελέτες που πραγματοποιήθηκαν και ακόμη πραγματοποιούνται με τα δεδομένα του GEOSAT είναι πολυάριθμες και ο δορυφόρος θεωρείται ως ένας από τους σημαντικότερους στη δορυφορική ωκεανογραφία και γεωδαισία (http://ibis.grdl.noaa.gov).

Την αποστολή του GEOSAT ακολούθησε αυτή του Ευρωπαϊκού δορυφόρου ERS-1 (European Remote-Sensing Satellite 1) από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA-European Satellite Agency). Ο δορυφόρος εκτοξεύτηκε στις 17 Ιουλίου 1991 και οι διαστάσεις του (12m x 12m x 2,5m και βάρος 2400 kg) τον καθιστούσαν τον περιπλοκότερο και μεγαλύτερο δορυφόρο που είχε δημιουργηθεί μέχρι τότε στην Ευρώπη.Στην πλατφόρμα του δορυφόρου υπήρχε ένα σύνολο οργάνων και αισθητήρων που του επέτρεπε ακριβείς παρατηρήσεις παντός καιρού σε όλη τη διάρκεια του 24ώρου. Πρωταρχικός σκοπός του δορυφόρου ήταν η μελέτη των ωκεανών, η καταγραφή της κίνησης των πάγων, η μέτρηση του ύψους των θαλασσών και της θερμοκρασίας καθώς και η μέτρηση της ταχύτητας και της διεύθυνσης των ανέμων. Ο δορυφόρος ήταν προγραμματισμένος να λειτουργήσει για δύο μόνο χρόνια αλλά συνέχισε να καταγράφει παρατηρήσεις μέχρι και το 1996 ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση του διαδόχου του ERS-2 που χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα. Ο ERS-1 βρισκόταν σε μια πολική ηλιοσύγχρονη τροχιά με κλίση 98.5° και μέσο ύψος 780km. Εκτέλεσε 7 φάσεις τις A, B, C, D, E, F και E. Η πρώτη φάση αναφερόταν στον έλεγχο του δορυφορικού συστήματος και τη βαθμονόμηση των οργάνων, η B στην πρώτη φάση παρακολούθησης και καταγραφής των πάγων, η C ήταν η πρώτη ακριβώς επαναλαμβανόμενη τροχιά (ERM), η D ήταν η δεύτερη φάση καταγραφής των πάγων, η E ήταν η πρώτη γεωδαιτική αποστολή και η F η δεύτερη ενώ η E ήταν η δεύτερη φάση της ακριβώς επαναλαμβανόμενης τροχιάς που έγινε παράλληλα με αυτή του ERS-2. Η αποστολή του δορυφόρου ολοκληρώθηκε στις 10 Μαρτίου του 2010 και μία

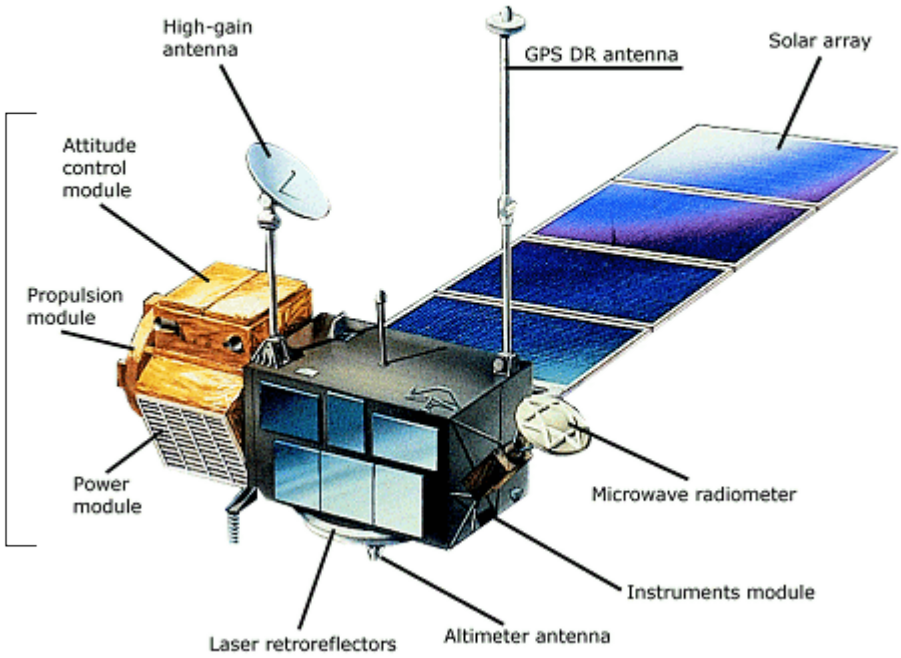
εντυπωσιακή ομοιογενής και συνεχής ποσότητα δεδομένων των παραμέτρων της επιφάνειας της θάλασσας είναι πλέον διαθέσιμη (http://www-aviso.cnes.fr).



Σχήμα 2.5: Ο δορυφόρος ERS-1 (Σχήμα από http://www.ga.gov.au)

Στη συνέχεια, ο δορυφόρος TOPEX/Poseidon αποτέλεσε μια κοινή προσπάθεια της NASA (National Aeronautics and Space Administration Εθνικός Οργανισμός Αεροναυτικής και Διαστήματος των ΗΠΑ) και του CNES (Central Nationale d' Etudes Speciales) στο να κατασκευάσουν ένα δορυφόρο που παρέχει υψηλές ακρίβειες και θα έχει μεγάλη διάρκεια ζωής. Το όνομα του προέρχεται από τα ονόματα των δύο αλτιμέτρων που φέρει. Το ένα κατασκευάστηκε από τη NASA και ονομάστηκε TOPographic EXperiment (TOPEX) και το άλλο κατασκευάστηκε από το CNES και ονομάστηκε POSEIDON. Ο δορυφόρος εκτοξεύτηκε στις 10 Αυγούστου του 1992 με στόχο την παρατήρηση και την κατανόηση της κυκλοφορίας των ωκεανών. Περιστρεφόταν σε ύψος 1336 km με κλίση 66.04° και τροχιά σχεδόν κυκλική. Η περίοδος του ήταν 112 min και το ίχνος της τροχιάς του επαναλαμβανόταν με ακρίβεια 1km. Κάθε 10 ημέρες παρείχε την ωκεάνια τοπογραφία ή το ύψος της θάλασσας με πρωτοφανή ακρίβεια συμπληρώνοντας έτσι διάφορα ωκεανογραφικά και μετεωρολογικά προγράμματα. Ο τεράστιος όγκος δεδομένων που προέκυψε μετά από 13 χρόνια επιτυχούς αποστολής και περίπου 62000 τροχιών γύρω από τη Γη, κατέστησε δυνατή τη μελέτη και άλλων φαινομένων, πέρα των κλασσικών πού είχαν παρατηρηθεί στις προηγούμενες αλτιμετρικές αποστολές. Έτσι η κίνηση των θαλάσσιων ρευμάτων και παλιρροιών, η ένταση και οι συνέπειες άλλων κλιματολογικών φαινόμενων μελετήθηκαν ενώ δεδομένα της αποστολής αυτής χρησιμοποιήθηκαν στην ασφαλή ναυσιπλοΐα, τη διαχείριση της αλιείας, την έρευνα των θαλασσίων θηλαστικών και άλλες εφαρμογές. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε ότι οι προηγούμενες αποστολές δεν είχαν τη δυνατότητα ακριβούς προσδιορισμού της δορυφορικής τροχιάς με συνέπεια τη μείωση της ακρίβειας των αλτιμετρικών δεδομένων. Αντίθετα, στο δορυφόρο TOPEX είναι εγκατεστημένα τρία συστήματα

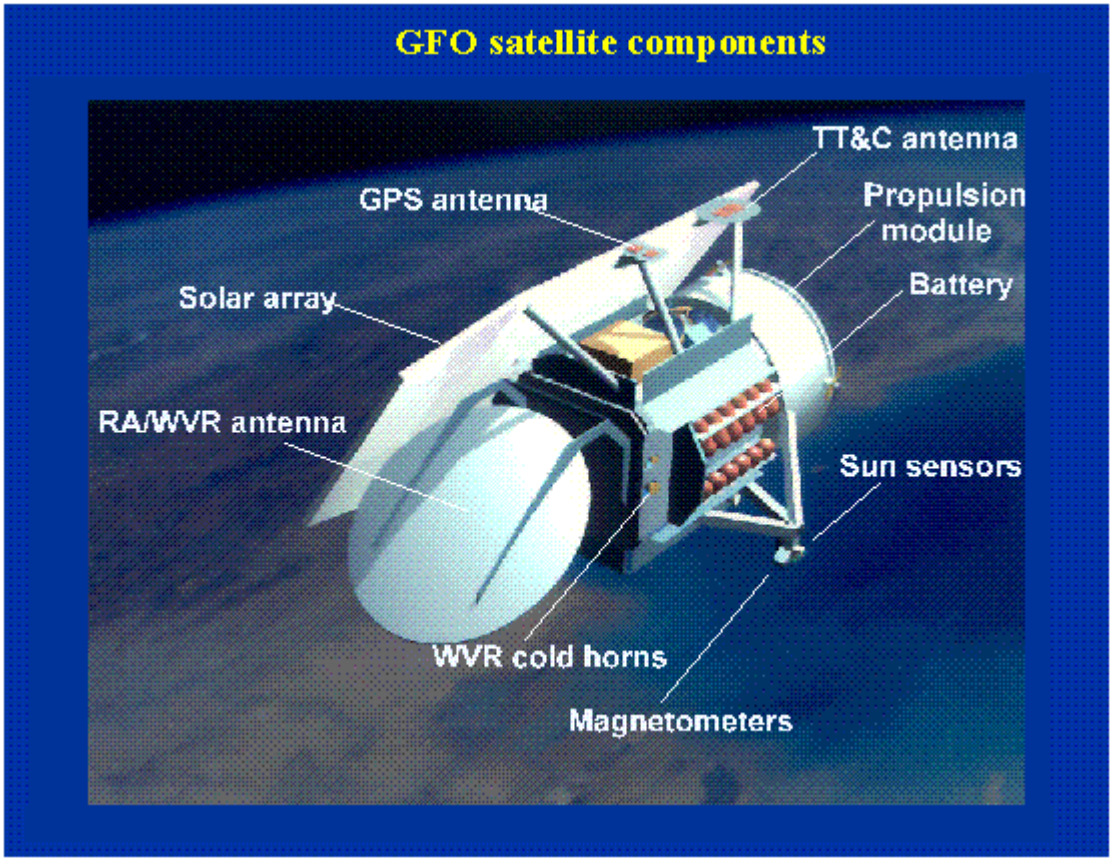
προσδιορισμού-εντοπισμού θέσης που επιτρέπουν τον προσδιορισμό της τροχιάς με μια ακρίβεια της τάξης των 1-2 cm. Οι τρεις ανεξάρτητες αυτές τεχνικές είναι το Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Προσδιορισμού Θέσης (Global Positioning System GPS), το σύστημα DORIS (Doppler Orbitography and Radiolocation Integrated by Satellite) καθώς και ένα radar SLR. Η πρωτοποριακή ακρίβεια του προσδιορισμού της τροχιάς του, οδήγησε στη χρησιμοποίηση του TOPEX/POSEIDON σαν δορυφόρου αναφοράς στην προσέγγιση και διόρθωση της τροχιάς και άλλων αλτιμετρικών δορυφόρων (http://www.aviso.oceanobs.com).



Σχήμα 2.6: Ο δορυφόρος TOPEX Poseidon (Σχήμα από http://www.aviso.cnes.fr)

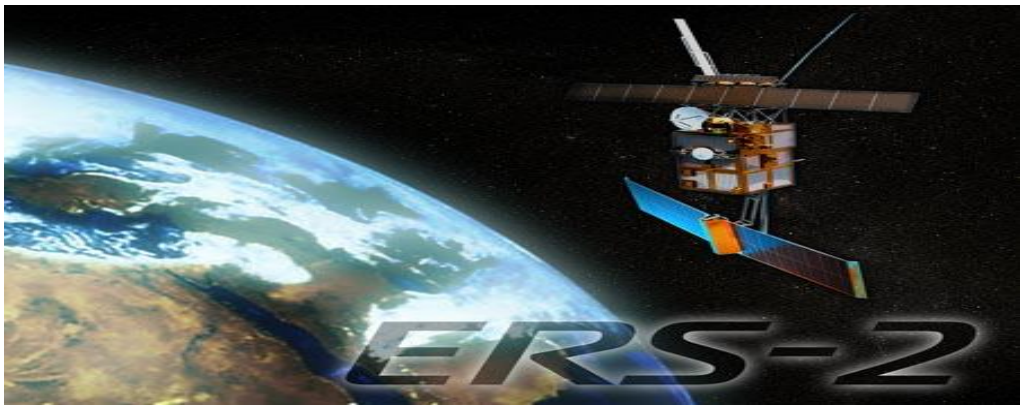
Ο δορυφόρος GFO (Geosat Follow-On) αποτέλεσε μια πρωτοβουλία του Αμερικάνικου Ναυτικού (US Navy) για να συνεχιστούν οι επιτυχημένες αλτιμετρικές αποστολές που άρχισαν με την επιτυχή αποστολή του δορυφόρου Geosat. Εκτοξεύτηκε στις 10/2/1998 και το ύψος της τροχιάς του ήταν 784 χιλιόμετρα. Η λειτουργία του δορυφόρου παρουσίασε πολλά προβλήματα από τα πρώτα μόλις χρόνια λειτουργίας του. Οι επεξεργαστές που βρισκόταν στην πλατφόρμα του δορυφόρου παρουσίασαν προβλήματα, τα οποία ξεπεράστηκαν μετά τα δύο πρώτα χρόνια λειτουργίας. Το σημαντικότερο όμως πρόβλημα ήταν οι 4 δέκτες GPS με τους οποίους ήταν εφοδιασμένος ο δορυφόρος και οι οποίοι δε λειτούργησαν ποτέ. Όμως, τα δεδομένα από τα συστήματα SLR και Doppler επέτρεψαν τον ακριβή προσδιορισμό της τροχιάς του δορυφόρου και διέσωσαν την αποστολή. Τα δεδομένα της αποστολής χρησιμοποιήθηκαν σε πολλές επιστημονικές εφαρμογές κυρίως σε συνδυασμό με δεδομένα και άλλων δορυφορικών αποστολών. Η χαρτογράφηση ανεμοστρόβιλων, η απεικόνιση σε σχεδόν πραγματικό χρόνο όσον αφορά τις προβλέψεις τυφώνων είναι μερικές από τις εφαρμογές, ενώ μελλοντικές βελτιώσεις της τροχιάς αναμένονται με τη χρήση μοντέλων βαρύτητας του δορυφόρου GRACE. Ο δορυφόρος σταμάτησε τη λειτουργία του στις 25 Σεπτεμβρίου του 2008 καθώς η ηλικία των μπαταριών και άλλων συστημάτων

που υπήρχαν στο δορυφόρο έκαναν την αποκατάσταση και την επιστροφή στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας αδύνατες (http://earth.esa.int).



Σχήμα 2.7: Ο δορυφόρος GFO (Σχήμα από http://ibis.grdl.noaa.gov)

Ο δεύτερος ευρωπαϊκός δορυφόρος τηλεπισκόπησης (ERS-2) κατασκευάστηκε από την ESA και τέθηκε σε τροχιά στις 21 Απριλίου 1995. Αποτελεί τη συνέχεια του ERS-1 και σχεδιάστηκε για να δώσει απαντήσεις σε μια σειρά από εξειδικευμένα ερωτήματα. Η πλατφόρμα του δορυφόρου ήταν εξοπλισμένη με τα ίδια όργανα που είχε και ο προκάτοχός του, ενώ προστέθηκε και ένα ακόμη φασματόμετρο το GOME (Global Ozone Monitoring Experiment). Το όργανο αυτό μετρά το φως στην υπεριώδη και ορατή περιοχή του φάσματος και σχεδιάστηκε για να μετρήσει την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε όζον.

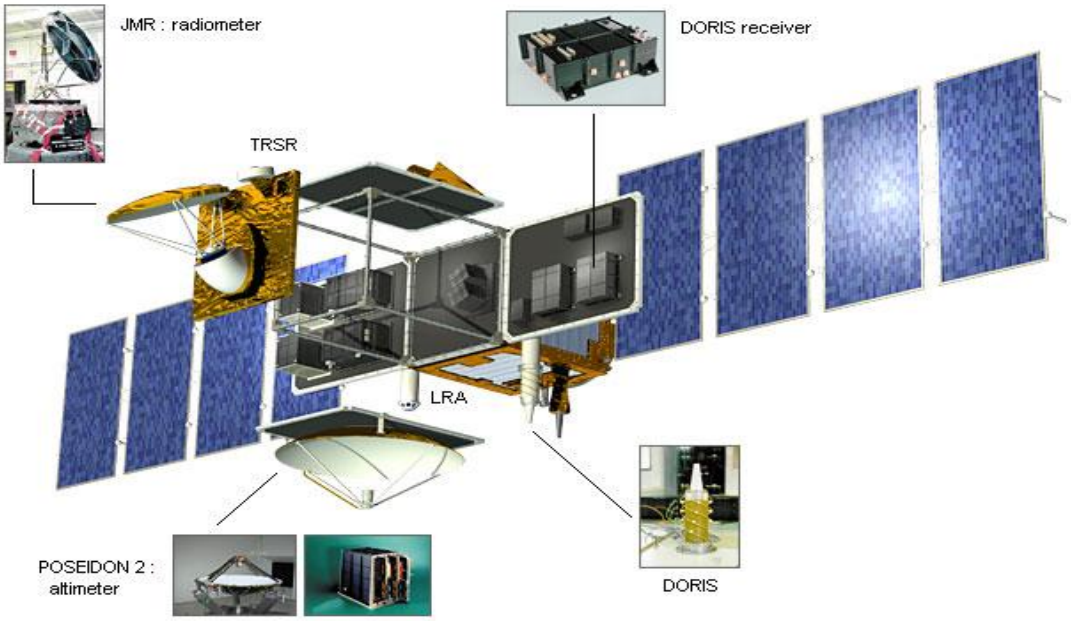


Σχήμα 2.8: Ο δορυφόρος ERS-2 (Σχήμα από http://www.guarniero.nl)

Μετά την καταστροφή, κατά τη διάρκεια της εκτόξευσης, του δορυφόρου Cryosat στις 8 Οκτωβρίου του 2005, άρχισαν αμέσως οι ενέργειες για τη δημιουργία μιας αποστολής που θα αντικαθιστούσε αυτήν του Cryosat. Ο δορυφόρος Cryosat-2 κατασκευάστηκε λοιπόν, με στόχο τον προσδιορισμό των αλλαγών στο υψόμετρο και το πάχος των πάγων στην ξηρά και την θάλασσα. Ο δορυφόρος θα δώσει απαντήσεις σε ένα από τα πιο πολυσυζητημένα περιβαλλοντολογικά θέματα της εποχής μας. Τα δεδομένα της αποστολής θα καθορίσουν αν οι μάζες πάγου λεπταίνουν ή όχι, λόγω της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας που παρατηρείται λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου. Για την πραγματοποίηση αξιόπιστων μετρήσεων επάνω από τις πολικές περιοχές, ο Cryosat-2 πρέπει να ακολουθήσει μία ασυνήθιστη τροχιά που φτάνει ακόμη και τις 88° σε γεωγραφικό πλάτος τόσο στο Βορρά όσο και στο Νότο. Η τροχιά αυτή θα έχει σαν αποτέλεσμα την έκθεση όλων των μερών του δορυφόρου σε πολύ δυνατή ισχύ της ηλιακής θερμότητας, ενώ σε άλλα σημεία ο μισός δορυφόρος θα παραμένει σε πλήρη σκιά για εβδομάδες. Αντίθετα με τους περισσότερους δορυφόρους, ο Cryosat-2 δεν έχει κινούμενα μέρη εκτός από μερικές βαλβίδες στο σύστημα προώθησης. Αυτό αποφέρει μια αξιοσημείωτη μείωση του κόστους αλλά δημιουργεί προβλήματα στην παροχή επαρκούς ενέργειας στο δορυφόρο κατά μήκος της ασυνήθιστης τροχιάς του. Τα ηλιακά πλαίσια είναι τοποθετημένα άκαμπτα επάνω στο σώμα του δορυφόρου υπό τέτοια γωνία ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής ενέργεια καθ’ όλη τη διάρκεια της τροχιάς. Ο δορυφόρος εκτοξεύτηκε στις 8 Απριλίου του 2010 (http://www.guarniero.nl).

Σχήμα 2.9: Ο δορυφόρος Cryosat (Σχήμα από http://gizmodo.com)

Ο δορυφόρος Jason-1, αποτελεί κοινή προσπάθεια της NASA και του CNES και εκτοξεύτηκε στο διάστημα στις 7 Δεκεμβρίου 2001 αποτελώντας τη συνέχεια του δορυφόρου TOPEX/Poseidon. Η ονομασία του δορυφόρου προέρχεται από τον μυθικό ήρωα Ιάσωνα.



Σχήμα 2.10: Ο δορυφόρος Jason1 και τα όργανα του (Σχήμα από www.aviso.oceanobs.com)

Οι στόχοι της αποστολής έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στην ωκεανογραφία, τη μετεωρολογία, την κλιματολογία και το σύνολο των γεωεπιστημών. Γενικότερα, η ωκεάνια μεταβλητότητα αποτελεί τον κεντρικό στόχο της συγκεκριμένης αποστολής. Η τροχιά του δορυφόρου καλύπτει το 90% της επιφάνειας των θαλασσών, που δεν καλύπτεται από πάγους, κάθε 10 ημέρες. Η παράδοση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο καθιστά δυνατή την έκδοση ωκεάνιων δελτίων με τον ίδιο σχεδόν τρόπο που γίνονται οι καιρικές προβλέψεις. Τα αλτιμετρικά δεδομένα δίνουν πληροφορίες ζωτικής σημασίας για τη μελέτη και την πρόβλεψη του κλίματος και κυρίως κλιματολογικών φαινομένων όπως το *El* Niño. Η δυνατότητα του Jason να μετρά τη μέση στάθμη θάλασσας με ακρίβεια mm αποτελεί ένα μεγάλο πλεονέκτημα για τη μελέτη της αλλαγής του κλίματος. Σε ό,τι αφορά τη θαλάσσια μετεωρολογία, τα δεδομένα που αφορούν τα ύψη των κυμάτων καθώς και την ταχύτητα των ανέμων, είναι διαθέσιμα μέσα σε 3 ώρες. Αυτές οι πληροφορίες θα βοηθήσουν τους μετεωρολόγους να κατανοήσουν καλύτερα και να προβλέψουν τις καιρικές συνθήκες επάνω από τους ωκεανούς. Τέλος, το βαρυτικό πεδίο της Γης επηρεάζει το επίπεδο της θάλασσας. Με τη μέτρηση της δυναμικής ωκεάνιας τοπογραφίας, νέα στοιχεία προκύπτουν για την κίνηση των τεκτονικών πλακών, την υποθαλάσσια τοπογραφία, τις μετακινήσεις του γήινου μανδύα και άλλα γεωφυσικά φαινόμενα.

Η επιτυχία της αποστολής Jason-1 είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας νέας προσπάθειας που υλοποιήθηκε με την εκτόξευση του δορυφόρου Jason-2. Η Ocean Surface Topography Mission του Jason-2 (OSTM-αποστολή για την τοπογραφία της επιφάνειας των ωκεανών), είναι μία διεθνής δορυφορική αποστολή που θα επεκτείνει τη συνεχόμενη καταγραφή του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας στην επόμενη δεκαετία.Αποτελεί το αποτέλεσμα της συνεργασίας μεταξύ της NASA (National Aeronautics and Space Administration) της NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) της CNES (Centre

National d'Etudes Spatiales) και της EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites). Η τροχιά του είναι ίδια με αυτήν του προκάτοχού του Jason-1 στα 1,336 km στο ίδιο επίπεδο κλίσης των 66° ως προς τον Ισημερινό. Έχει περίοδο δέκα ημερών και καλύπτει το 95% της ελεύθερης επιφάνειας των ωκεανών.

Η αποστολή θα λειτουργήσει ως γέφυρα μετάβασης των δεδομένων σε παγκόσμιες μετεωρολογικές υπηρεσίες πρόγνωσης του καιρού και του κλίματος που θα τα χρησιμοποιήσουν για βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες προγνώσεις. Επίσης, θα δώσει επιπλέον πληροφορίες για το ρυθμό αύξησης της επιφάνειας της θάλασσας (0.3 cm/year βάση στοιχείων των προηγούμενων αλτιμετρικών αποστολών) και τις όποιες μεταβολές του σε ετήσια βάση. Εξάλλου, δεδομένα της αποστολής πρόκειται να συνδυαστούν με αυτά της αποστολής Grace δείχνοντας κατά πόσο το λιώσιμο των πάγων και η υπερθέρμανση των ωκεανών επηρεάζουν την άνοδο της στάθμης της θάλασσας. Τέλος, η αποστολή θα αποτελέσει σημαντικό εργαλείο στα χέρια των επιστημόνων για να μελετήσουν καλύτερα την ικανότητα των ωκεανών να αποθηκεύουν θερμότητα και να αναλύσουν μεγάλα κλιματολογικά φαινόμενα όπως το El Niño και η La Niña (http://www.altimetry.info).

Σχήμα 2.11: Ο δορυφόρος Jason 2 (Σχήμα από eumetsat.int)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των αλτιμετρικών αποστολών του παρελθόντος, αυτών που βρίσκονται σε εξέλιξη καθώς και αυτών των οποίων η εκτόξευση έχει ανακοινωθεί στο εγγύς μέλλον. Οι πρώτες στις αρχές της δεκαετίας του ‘70 καθώς και αυτές που αναμένονται μέχρι και το 2020. Είναι χαρακτηριστικό πως οι περισσότερες ονομασίες των δορυφόρων προέρχονται από το στόχο της αποστολής, ενώ τα πρωτεία στις αποστολές κατέχουν η Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (European Space Agency) και η Εθνική Υπηρεσία Αεροναυτικής και Διαστήματος των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (National Aeronautics and Space Administration).

Πίνακας 2.1: Τα χαρακτηριστικά των αλτιμετρικών δορυφόρων

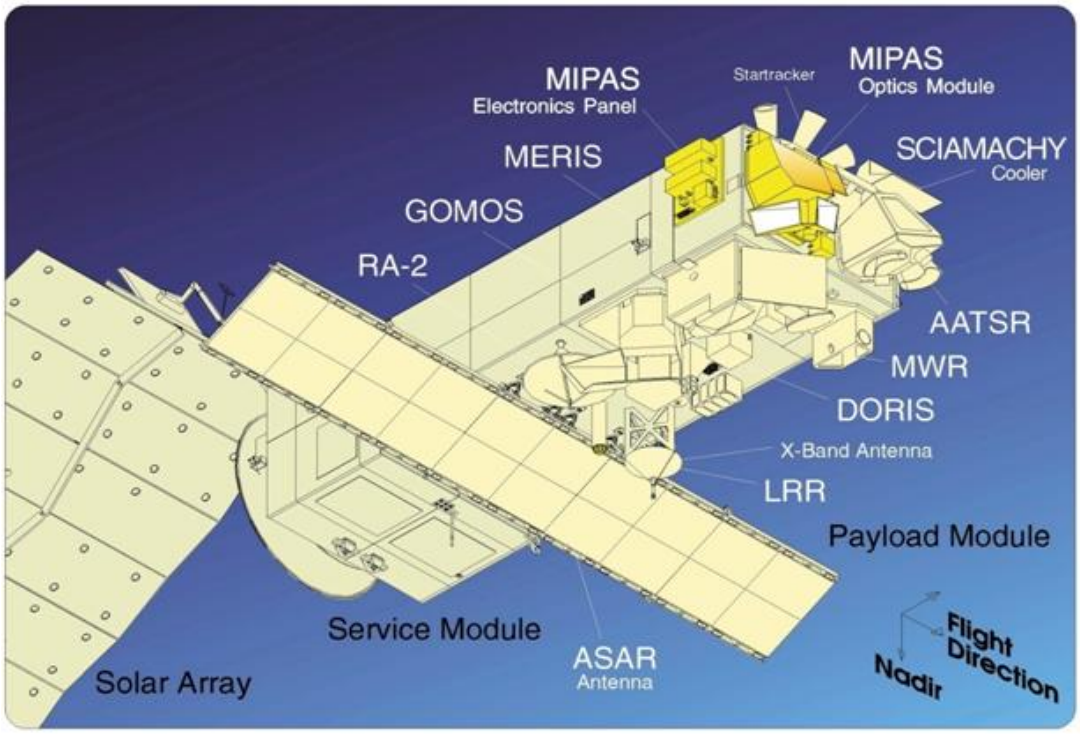
ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΣΤΟΛΗΣ	ΟΝΟΜΑ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥ	ΗΜ/ΝΙΑ ΕΚΤΟΞΕΥΣΗΣ	ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ	ΣΤΟΧΟΣ ΑΠΟΣΤΟΛΗΣ
ΠΑΡΕΛΘΟΝ	Skylab	14/05/1973	NASA	ηλιακή αστρονομία
	GEOS 3	09/04/1975	NASA	ανωμαλίες βαρύτητας και χαρτογράφηση των ωκεανών
	Seasat	26/06/1978	NASA	μελέτη της Γης και των θαλασσών της
	Geosat	10/03/1985	US Navy	περιγραφή θαλάσσιου γεωειδούς
	ERS-1	17/07/1991	ESA	παρατήρηση της Γης και του περιβάλλον της
	Topex/Poseidon	10/08/1992	NASA/Cnes	μέτρηση του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας
	GFO	10/02/1998	US Navy /Noaa	μέτρηση της ωκεάνιας τοπογραφίας
	ERS-2	21/04/1995	ESA	παρατήρηση της Γης και του περιβάλλον της
	Envisat	01/03/2002	ESA	παρατήρηση της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας της Γης
ΠΑΡΟΝ	HY-2A	15/08/2011	1. *China Acad. of Space Tech.*	παρατήρηση των ωκεάνιων ρευμάτων
	Cryosat-2	08/04/2010	ESA	παρατήρηση των πόλων
	JASON-1	07/12/2001	NASA/Cnes	μέτρηση του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας
	JASON-2	20/06/2008	Cnes/NASA/Eumetsat/Noaa	μέτρηση του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας
ΜΕΛΛΟΝ	Saral	2012	Isro/Cnes	παρατήρηση των ωκεανών
	Sentinel-3	2014	ESA	παροχή λειτουργικών υπηρ. στους χρήστες

	Jason-3	April 2014	ESA	μέτρηση του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας
	Jason-CS	end 2017	Cnes/NASA/Eumetsat/Noaa	μέτρηση του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας
	SWOT	2020	Cnes/NASA	Υδρολογία και Ωκεανογραφία

2.2.2 Η δορυφορική αποστολή Envisat

Το Μάρτιο του 2002 εκτοξεύτηκε στο διάστημα από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος, ο ENVISAT (ENVIronmental SATellite-Περιβαλλοντολογικός δορυφόρος). Ο δορυφόρος αποτελεί τη συνέχεια των ERS-1 και ERS-2 και διαγράφει μια ηλιοσύγχρονη πολική τροχιά σε ύψος 800 km με περίοδο 35 ημερών. Σχεδιασμένος για περιβαλλοντολογικές μελέτες, όπως περιγράφεται και από την ονομασία του, αποστολή του είναι η παρατήρηση της γήινης επιφάνειας και ατμόσφαιρας με απώτερο σκοπό τη μελέτη της κλιματικής αλλαγής. Ο δορυφόρος φέρει ένα αρκετά "φιλόδοξο" και καινοτόμο ωφέλιμο φορτίο που διασφαλίζει την συνέχεια των δεδομένων των αποστολών ERS της ESA.

Ο ENVISAT φέρει δέκα συμπληρωματικά όργανα για την παρατήρηση παραμέτρων που ποικίλουν από το θαλάσσιο γεωειδές ως και εκπομπές αερίων υψηλής ανάλυσης. Έτσι, εκτός από το αλτίμετρο, το ραδιόμετρο και τα συστήματα εντοπισμού που αναφέρθηκαν στο δορυφόρο Jason, ο Envisat έχει και άλλα όργανα που διευρύνουν τις δυνατότητες του. Ένα ραντάρ SAR το ASAR (ραντάρ συνθετικού διαφράγματος) που επιτρέπει την παραγωγή εικόνων υψηλής ανάλυσης και το φασματόμετρο MERIS που μετρά τις ιδιότητες του φωτός στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Επιπλέον, το AATSR, ένα ραδιόμετρο σάρωσης κατά μήκος της τροχιάς, χρησιμοποιείται για την εξασφάλιση της συνέχειας των δεδομένων που αφορούν τη θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας, με το φωτόμετρο GOMOS να μετρά την περιεκτικότητα των συστατικών της ατμόσφαιρας. Τέλος, το συμβολόμετρο MIPAS και το φασματόμετρο SCIAMACHY μετρούν και αναλύουν τις εκπομπές αερίων στην ατμόσφαιρα και τροπόσφαιρα-στρατόσφαιρα αντίστοιχα.



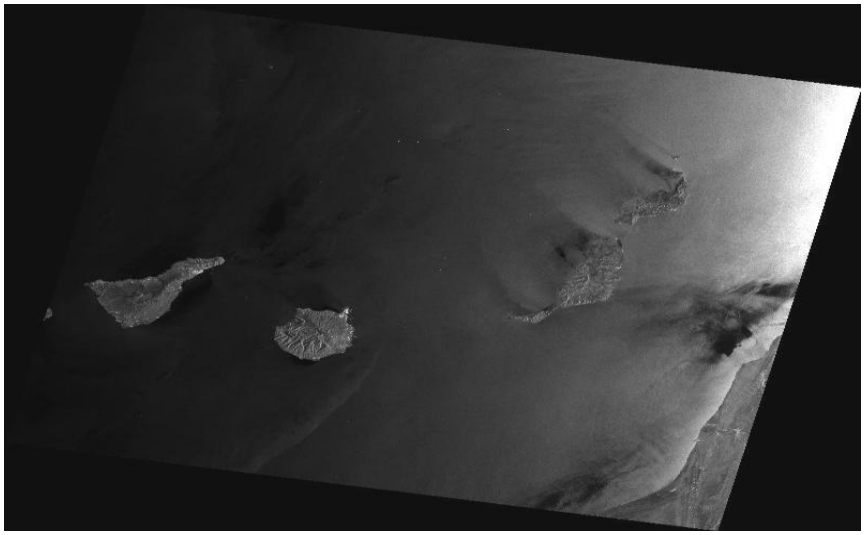
Σχήμα 2.12: Ο δορυφόρος Envisat και τα όργανα του (Σχήμα από http://esamultimedia.esa.int)

Κύριο στόχο του προγράμματος αποτελεί η δυνατότητα τηλεσκοπικών παρατηρήσεων της Γης από το διάστημα με σκοπό την περαιτέρω δυνατότητα μελέτης και παρακολούθησης της Γης και του περιβάλλοντός της. Βέβαια, ως πρωταρχικούς στόχους δε μπορούμε να παραλείψουμε και τους παρακάτω:

- την συνέχεια των παρατηρήσεων που ξεκίνησαν με τους δορυφόρους ERS
- την ανάδειξη της αποστολής του ERS, ιδίως όσον αφορά τα στοιχεία των ωκεανών και των πάγων
- τη διεύρυνση των πληροφοριών και των στοιχείων για τους παράγοντες που επηρεάζουν το περιβάλλον
- τη συνεισφορά στις περιβαλλοντικές μελέτες, κυρίως στον τομέα της χημείας της ατμόσφαιρας και της μελέτης των ωκεανών.
- την αποτελεσματικότερη παρακολούθηση και διαχείριση των πόρων της Γης
- την καλύτερη κατανόηση των διεργασιών της Γης

Σχήμα 2.13: Εικόνα από το δορυφόρο Envisat όπου φαίνεται ο καπνός από την πυρκαγιά στο Γραμματικό τον Αύγουστο 09 (http://spacegizmo.livingdazed.com)

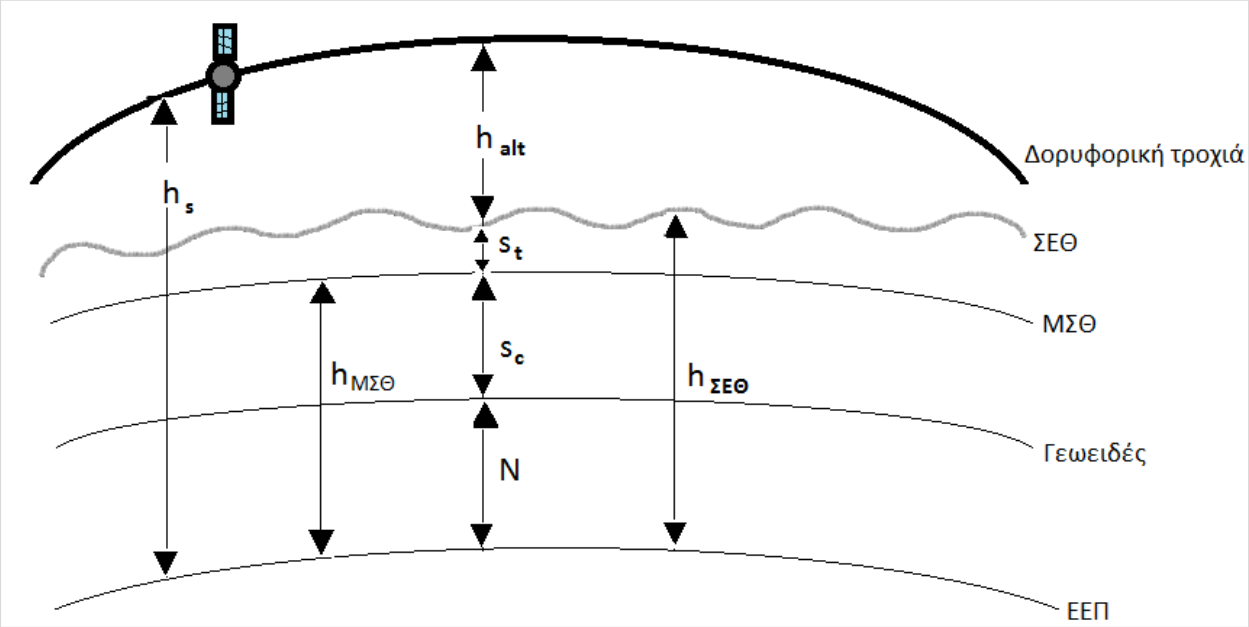
Ωστόσο, λίγες εβδομάδες μετά τον εορτασμό για τα δέκα χρόνια του δορυφόρου, η επαφή του δορυφόρου με τη Γη χάθηκε ξαφνικά στις 8 Απριλίου 2012. Μετά από ένα μήνα συνεχόμενων αποτυχημένων προσπαθειών προκειμένου να επανακτηθεί η επικοινωνία με το δορυφόρο, οι επιστήμονες ανακοίνωσαν το τέλος της αποστολής στις 9 Μαΐου. Αν και το πλάνο λειτουργίας του Envisat ήταν πέντε χρόνια, ο δορυφόρος τροφοδότησε τους επιστήμονες με πληροφορίες για δέκα χρόνια. Χιλιάδες terabytes δεδομένων με μετρήσεις που αφορούν την ξηρά, την ατμόσφαιρα, τους ωκεανούς και τα παγόβουνα είναι πλέον διαθέσιμα.



Σχήμα 2.14: Η τελευταία εικόνα που μεταδόθηκε από το δορυφόρο Envisat. Η λήψη έγινε από το ASAR του δορυφόρου και απεικονίζει τις Κανάριες Νήσους.(http://www.space.com/15608-huge-satellite-envisat-dead-space.html)

2.3 Ανωμαλίες της επιφάνειας της θάλασσας και δυναμική θαλάσσια τοπογραφία

Πριν αναφερθούμε στις ανωμαλίες της επιφάνειας της θάλασσας και τη δυναμική θαλάσσια τοπογραφία κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούμε ξανά στη διαδικασία της δορυφορικής αλτιμετρίας. Το σύνολο των παρατηρήσεων του αλτιμέτρου αποδίδει την απόσταση μεταξύ του δορυφορικού σκάφους και της Στιγμιαίας Επιφάνειας της Θάλασσας-ΣΕΘ (Instantaneous Sea Surface Topography).

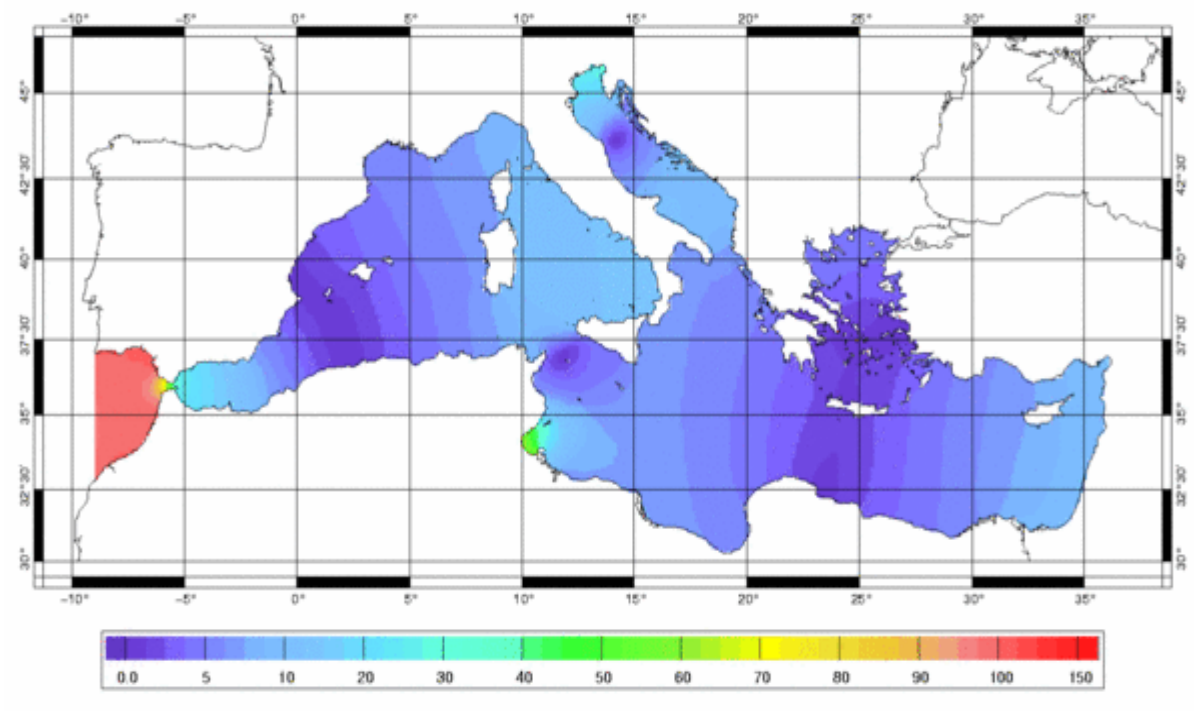


Σχήμα 2.15: Η αρχή της δορυφορικής αλτιμετρίας (Κατσαδούρου, 2012)

2.3.1 Ανωμαλίες της επιφάνειας της θάλασσας

Η απόσταση ανάμεσα στη στιγμιαία επιφάνεια της θάλασσας (ΣΕΘ-instantaneous sea surface) και τη μέση στάθμη της θάλασσας (ΜΣΘ-mean sea surface) οφείλεται σε πολλούς παράγοντες, μεταξύ των οποίων οι γήινες παλίρροιες, τα θαλάσσια ρεύματα και τα μετεωρολογικά φαινόμενα. Η γη, λόγω των ελαστικών ιδιοτήτων που παρουσιάζει, μπορεί να χαρακτηρισθεί σαν ένα ελαστικό σώμα. Το ελαστικό αυτό σώμα υφίσταται παραμορφώσεις λόγω των παλιρροιών τόσο του στερεού φλοιού ς όσο και των θαλασσών. Οι παλίρροιες είναι αποτέλεσμα των δυνάμεων που ασκούνται στη γη από τη σελήνη κατά κύριο λόγο και τον ήλιο αλλά και διάφορα άλλα αστρικά σώματα. Οι παραμορφώσεις του γήινου σώματος, που μπορεί να παρομοιαστούν με συμπιέσεις, ισοδυναμούν με κινήσεις κάποιων μαζών, οι οποίες προκαλούν ένα δυναμικό, το *παλιρροϊκό δυναμικό (tidal potential)*. Αν θέλουμε να απομονώσουμε τις παλίρροιες των θαλασσών από τις παλίρροιες του στερεού φλοιού της γης, θα αναφερθούμε πάλι στις ίδιες γενεσιουργές δυνάμεις, δηλαδή τις επιδράσεις σελήνης και ήλιου επάνω στα επιφανειακά ύδατα της γης, που με τη σειρά τους πιέζουν τις στερεές ελαστικές μάζες. Η διαφορά είναι ότι οι παλίρροιες των θαλάσσιων υδάτων είναι ένα πιο σύνθετο φαινόμενο, επειδή επηρεάζονται και από μετεωρολογικά φαινόμενα (άνεμοι) και από την πίεση των θαλάσσιων μαζών, που δημιουργούν άλλα επιφανειακά

ρεύματα. Η επίδραση του φαινομένου των παλιρροιών είναι δυνατόν να προσεγγιστεί μέσω συνεχώς βελτιούμενων μοντέλων σε διάφορες κλίμακες. (Νατσιόπουλος, 2010)



Σχήμα 2.16: Πρόβλεψη για το εύρος σε cm της κύριας σεληνιακής παλίρροιας στη Μεσόγειο από το μοντέλο CEFMO (Σχήμα από AVISO).

2.3.2 Η δυναμική τοπογραφία της επιφάνειας της θάλασσας

Αν και θεωρητικά η Μέση Στάθμη της Θάλασσας (επιφάνεια μηδενικού ύψους zero-height surface), συμπίπτει με το γεωειδές στις περιπτώσεις προσδιορισμού μοντέλων του γεωειδούς, στην πραγματικότητα αυτό δεν ισχύει, όταν οι απαιτήσεις ακρίβειας αυξάνονται. Το γεωειδές αποτελεί μια ισοδυναμική επιφάνεια η οποία μεταβάλλεται χωρικά και χρονικά, εξαιτίας των μεταβολών του γήινου βαρυτικού πεδίου, παρουσιάζοντας αποχές από την Μέση Στάθμη της Θάλασσας, και προσεγγίζεται μέσω σφαιρικών αρμονικών συναρτήσεων με αναλυτικούς υπολογισμούς, υποθέσεις και παραδοχές. Η αποχή αυτή της Μέσης Στάθμης της Θάλασσας από το γεωειδές ονομάζεται δυναμική θαλάσσια τοπογραφία (DOT-Dynamic Ocean Topography) ή τοπογραφία της επιφάνειας της θάλασσας (SST-Sea Surface Topography). Οι αποχές του γεωειδούς από την Μέση Στάθμη της Θάλασσας σε παγκόσμια κλίμακα είναι της τάξεως των 70cm έως -2.2m (Ανταρκτική) με μια τυπική απόκλιση ±62cm (Koblinsky et al. 1999), ενώ γενεσιουργές αιτίες των αποχών αυτών αποτελούν τα δυναμικά ωκεάνια φαινόμενα, τα οποία προκαλούνται από τις επιδράσεις της ατμόσφαιρας (άνεμοι, ατμοσφαιρική πίεση) και τις διαφορές που παρουσιάζονται στις ιδιότητες του νερού (θερμοκρασία, πυκνότητα, αλατότητα).

Η δυναμική θαλάσσια τοπογραφία διακρίνεται σε δύο συνιστώσες:

1. Το σχεδόν στάσιμο μέρος $\boldsymbol{s_c}$ (ΣΣΤΕΘ, σχεδόν-στάσιμη τοπογραφία της επιφάνειας της θάλασσας) , το οποίο δεν μεταβάλλεται με το χρόνο, και
2. Το χρονικά μεταβαλλόμενο μέρος $\boldsymbol{s_t}$ (ΧΜΤΕΘ, χρονικά μεταβαλλόμενη τοπογραφία της επιφάνειας της θάλασσας), το οποίο μεταβάλλεται με τον χρόνο εξαιτίας των δυναμικών ωκεάνιων φαινομένων.

Σύμφωνα λοιπόν με όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως, η σχέση σύνδεσης των υψομέτρων του γεωειδούς (N), των υψομέτρων της θαλάσσιας επιφάνειας (SSH- Sea Surface Height ή h^{alt}) και της τοπογραφίας της θαλάσσιας επιφάνειας (SST-Sea Surface Topography) είναι η εξής (Εξ. 2.2):

$$SSH = N + SST \tag{2.2}$$

ή

$$h^{alt} = N + s \tag{2.3}$$

όπου

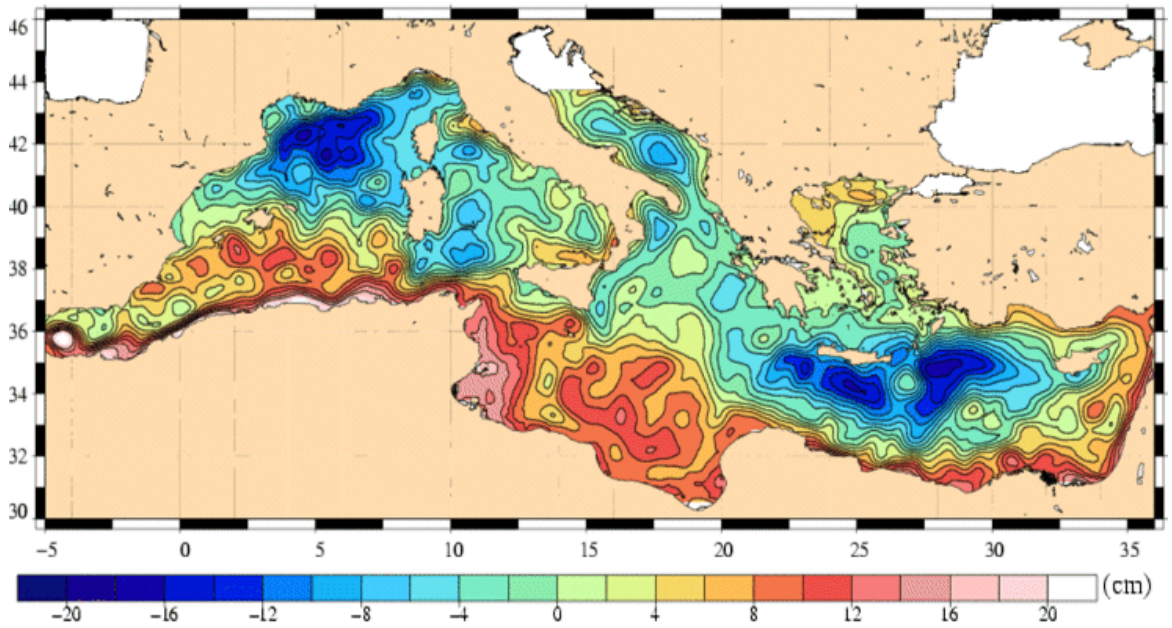
$$s = s_c + s_t \tag{2.4}$$

είναι η θαλάσσια τοπογραφία, ως το άθροισμα των δυο συνιστωσών, της σχεδόν στάσιμης συνιστώσας της τοπογραφίας της θάλασσας και της χρονικά μεταβαλλόμενης τοπογραφίας της επιφάνειας της θάλασσας. Η τοπογραφία της επιφάνειας της θάλασσας μπορεί να προσδιοριστεί είτε άμεσα από ωκεανογραφικές παρατηρήσεις ατμοσφαιρικής πίεσης, ταχύτητας ρευμάτων και ανέμων, θερμοκρασίας, πυκνότητας και αλατότητας καθώς επίσης και μέσω ωκεανογραφικών μοντέλων προσδιοριζόμενων από χρόνιες παρατηρήσεις, είτε μέσω γεωδαιτικών μεθόδων χρησιμοποιώντας μοντέλα γεωειδούς.

Στην περίπτωση προσδιορισμού της σχεδόν στάσιμης τοπογραφίας της επιφάνειας της θάλασσας μέσω γεωδαιτικών μεθόδων, η ΣΣΤΕΘ προκύπτει ως η διαφορά ενός αλτιμετρικού και ενός βαρυτιμετρικού μοντέλου γεωειδούς. Τα αλτιμετρικά μοντέλα γεωειδούς έχουν ως επιφάνεια αναφοράς την επιφάνεια της θάλασσας, για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η χρήση κάποιου παγκόσμιου μοντέλου της ΤΕΘ με σκοπό την αναγωγή των υψομέτρων στο γεωειδές. Βασικό μειονέκτημα των αναγωγών αυτών αποτελεί η σημαντικά περιορισμένη ακρίβεια στις κλειστές θάλασσες, αφού ο σχεδιασμός των μοντέλων της ΤΕΘ αφορά κυρίως την αναπαράσταση της θαλάσσιας τοπογραφίας των ωκεανών. Εναλλακτικά, η ΣΣΤΕΘ μπορεί να προσδιοριστεί μέσω των αλτιμετρικών υψομέτρων της ΤΕΘ και ενός γεωδυναμικού μοντέλου χαμηλού βαθμού ανάπτυξης. Και στις δύο περιπτώσεις ο προσδιορισμός της ΣΣΤΕΘ βασίζεται στη χρήση αναπτυγμάτων σφαιρικών αρμονικών συντελεστών. Ο προσδιορισμός συνεπώς της στάσιμης τοπογραφίας είναι σημαντικός τόσο για τη γεωδαισία όσο και την ωκεανογραφία, με σκοπό τον προσδιορισμό γεωειδούς με ακρίβεια ±1cm.

Η χρονικά μεταβαλλόμενη ΤΕΘ μπορεί να προσδιοριστεί με τη χρήση διαφόρων τεχνικών, όπως την ανάλυση επαναλαμβανόμενων τροχιακών ιχνών των αλτιμετρικών δορυφόρων και τον προσδιορισμό, και στη συνέχεια την αφαίρεση, της ΧΜΤΕΘ από τα αλτιμετρικά δεδομένα, ή με την υπόθεση ότι αποτελεί

μέρος του θορύβου των αλτιμετρικών παρατηρήσεων το οποίο απομακρύνεται κατά τη συνόρθωση στις τομές των τροχιακών ιχνών. Στο Σχήμα (2.17) φαίνεται η δυναμική θαλάσσια τοπογραφία, όπως υπολογίστηκε από δορυφορικές παρατηρήσεις και δεδομένα της αποστολής Grace.



Σχήμα 2.17: Μέση δυναμική τοπογραφία της θάλασσας την περίοδο 1993-1999 από αλτιμετρικά δεδομένα και δεδομένα της αποστολής Grace (Σχήμα από http://www.aviso.oceanobs.com)

2.4 Συναρτήσεις συμμεταβλητότητας και σημειακή προσαρμογή

Η λύση αρκετών προβλημάτων που σχετίζονται με τη γεωδαισία, την τοπογραφία και άλλες επιστήμες, καθώς και η εκτίμηση της ακρίβειας προσδιορισμού τους επιτυγχάνονται μέσω της χρήσης συναρτήσεων συμμεταβλητότητας που χρησιμοποιούνται σε μεθόδους όπως η σημειακή προσαρμογή για ανάλυση των ιδιοτήτων ενός σήματος και πρόγνωση. Οι συναρτήσεις συμμεταβλητότητας περιγράφουν τη στατιστική συμπεριφορά των διαφόρων μεγεθών και παρέχουν πληροφορίες για το βαθμό αλληλεξάρτησής τους (Δερμάνης, 1986). Ειδικότερα, οι συναρτήσεις συμμεταβλητότητας μπορεί να περιγράψουν:

- τη συσχέτιση που υπάρχει ανάμεσα σε δύο σήματα της ίδιας προέλευσης (συναρτήσεις αυτοσυμμεταβλητότητας - auto-covariance functions, π.χ., των τιμών των ανωμαλιών των υψομέτρων της επιφάνειας της θάλασσας) και
- τη συσχέτιση που υπάρχει ανάμεσα σε δύο σήματα διαφορετικής προέλευσης (συναρτήσεις διασυμμεταβλητότητας - cross-covariance functions π.χ. των τιμών της ανωμαλίας της βαρύτητας Δg και των υψομέτρων του Γεωειδούς N). (Βέργος, 2006)

Η συνάρτηση συμμεταβλητότητας μπορεί να περιγραφεί από τρία χαρακτηριστικά μεγέθη (θεμελιώδεις παραμέτρους – essential parameters) (Κατσάμπαλος-Τζιαβός, 1991)

- το μήκος συσχέτισης ξ (correlation length),
- τη μεταβλητότητα C_0
- την καμπυλότητα

Οι ποσότητες αυτές είναι σημαντικές στη διαδικασία παρεμβολής και πρόγνωσης σημάτων, όπως θα δούμε παρακάτω. Δύο άλλες σημαντικές ιδιότητες της συνάρτησης πού πρέπει να αναφερθούν στο σημείο αυτό είναι η ιδιότητα της ομογένειας (homogeneity) και η ιδιότητα της ισοτροπίας (isotropy). Η πρώτη προϋποθέτει ότι τα στατιστικά χαρακτηριστικά είναι ανεξάρτητα της θέσης-απόστασης μεταξύ δύο σημείων και η δεύτερη ότι είναι ανεξάρτητα του αζιμουθίου-διεύθυνσης. Στην πραγματικότητα οι παραπάνω ιδιότητες ισχύουν μόνο μέσω κατάλληλων υποθέσεων.

2.4.1 Εμπειρικές συναρτήσεις συμμεταβλητότητας και αναλυτικά μοντέλα

Σε πρακτικές εφαρμογές, όπως και στην παρούσα εργασία, ο υπολογισμός των συναρτήσεων συμμεταβλητότητας του μεγέθους που μελετάται, αποτελεί ίσως το πιο κρίσιμο σημείο για την προσέγγισή του, αφού ο ορθός υπολογισμός οδηγεί σε ασφαλείς και ορθές πληροφορίες για τα στατιστικά χαρακτηριστικά και της ιδιότητες του μεγέθους. Είναι λοιπόν απαραίτητο να γίνει μια διάκριση ανάμεσα στον παγκόσμιο και τον τοπικό χαρακτήρα των συναρτήσεων συμμεταβλητότητας. Μια παγκόσμια συνάρτηση συμμεταβλητότητας περιγράφει χαρακτηριστικά του σήματος-μεγέθους σε παγκόσμια κλίμακα και ως εκ τούτου δεν παρέχει καμία πληροφορία για τα τοπικά χαρακτηριστικά και τις ιδιαιτερότητες μιας περιορισμένης περιοχής. Είναι επομένως αναγκαία η χρησιμοποίηση τοπικών μετρήσεων προκειμένου να υπολογιστούν τοπικές συναρτήσεις συμμεταβλητότητας που θα περιγράφουν τα τοπικά χαρακτηριστικά του πεδίου. Είναι όμως πιθανόν η ίδια τοπική συνάρτηση συμμεταβλητότητας να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάποια άλλη περιοχή για να αποδώσει τα στατιστικά χαρακτηριστικά ενός μεγέθους.

Στο σημείο αυτό θα κάνουμε μία σύντομη περιγραφή των διαδικασιών προσδιορισμού της συνάρτησης συμμεταβλητότητας. Αρχικά, όπως έχουμε αναφέρει και στο προηγούμενο, κεφάλαιο τα δεδομένα μας είναι το γεωγραφικό πλάτος και μήκος (φ, λ) σημείων στο χώρο της Μεσογείου καθώς και η τιμή της ανωμαλίας της επιφάνειας της θάλασσας (SLA) στο σημείο αυτό. Υπολογίζονται όλες οι δυνατές σφαιρικές αποστάσεις (ψ) μεταξύ των σημείων μέσω της εξίσωσης (Εξ. 2.5)

$$\psi_{(i,j)}=\arccos\,[\sin\varphi_i\,\sin\varphi_j+\cos\varphi_i\,\cos\varphi_j(\cos\lambda_i\,\cos\lambda_j+\sin\lambda_i\,\sin\lambda_j)]. \qquad (2.5)$$

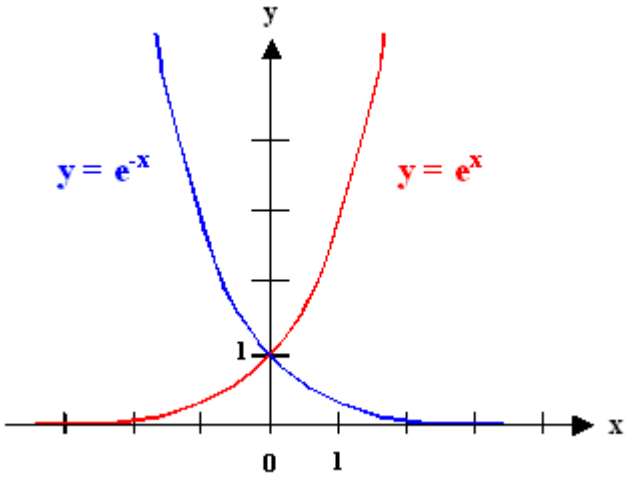
Στη συνέχεια από τις πρωτογενείς παρατηρήσεις αφαιρείται η κυρίαρχη τάση με την αφαίρεση της μέσης τιμής από τα δεδομένα. Επιλέγεται έπειτα το βήμα με το όποιο θα δημιουργηθούν οι κλάσεις μεταξύ των αποστάσεων και ταξινομούνται ανάλογα τα ζεύγη στις αντίστοιχες κλάσεις. Υπολογίζονται τα γινόμενα SLA_i*SLA_j για κάθε ζεύγος σημείων (i,j). Η τιμή κάθε κλάσης προκύπτει από το μέσο όρο των γινομένων όλων των ζευγών της κλάσης. Έτσι, η τιμή της συμμεταβλητότητας σε κάθε κλάση δίνεται από την εξίσωση

$$C_k = \frac{\sum sla_i sla_j}{N_k}, \qquad (2.6)$$

όπου N_k είναι ο αριθμός των γινομένων στη συγκεκριμένη κλάση (που ορίζεται από την απόσταση μεταξύ των σημείων). Από το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων υπολογίζονται οι εμπειρικές τιμές της συνάρτησης συμμεταβλητότητας των δεδομένων. Η συνάρτηση συμμεταβλητότητας περιορίζεται στο μήκος στο οποίο κρίνουμε ότι έχει αποδεκτά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, εφόσον το μήκος της δορυφορικής διάβασης είναι συνολικά 400 km δεν έχει νόημα η συνάρτηση συμμεταβλητότητας να υπολογίζεται σε μήκος μεγαλύτερο της παραπάνω τιμής. Στο επόμενο βήμα γίνεται η προσαρμογή των εμπειρικών τιμών σε κάποιο αναλυτικό μοντέλο (π.χ. εκθετικό μοντέλο, μοντέλο Markov). Από το αναλυτικό μοντέλο υπολογίζεται μια τοπική συνάρτηση συμμεταβλητότητας (αναλυτική συνάρτηση συμμεταβλητότητας).

Εκθετικά μοντέλα

Συχνά, για την εύρεση ενός αναλυτικού μοντέλου για την προσαρμογή της συνάρτησης συμμεταβλητότητας χρησιμοποιείται κάποια εκθετική συνάρτηση ή γενικότερα το γινόμενο μιας εκθετικής με μια άλλη συνάρτηση. Ως εκθετική καλείται οποιαδήποτε συνάρτηση της μορφής α^x, όπου α πραγματική σταθερά, α>0 και α≠1, ή συνηθέστερα e^x. Η συνάρτηση e^x είναι συνεχής και γνησίως αύξουσα σε όλο το πεδίο ορισμού της. Έχει σύνολο τιμών το (0,+∞), ενώ τέμνει τον άξονα τον άξονα y στο σημείο (0,1) και έχει ασύμπτωτη τον αρνητικό ημιάξονα των χ. Τα αντίθετα ισχύουν στην περίπτωση της συνάρτηση της e^{-x}. Είναι δηλαδή φθίνουσα, έχει σύνολο τιμών το (-∞,0) και έχει ασύμπτωτη το θετικό ημιάξονα των χ.



Σχήμα 2.18: Απεικόνιση των απλών εκθετικών συναρτήσεων (Σχήμα από http://www.glogster.com)

Επειδή η συνάρτηση συμμεταβλητότητας είναι κατά κανόνα φθίνουσα στις αριθμητικές εφαρμογές της εργασίας και έχει τόσο αρνητικές όσο και θετικές τιμές, χρησιμοποιήθηκαν διάφορα μοντέλα γενικευμένων εκθετικών συναρτήσεων που να προσαρμόζονται όσον το δυνατόν καλύτερα στις τιμές της συνάρτησης συμμεταβλητότητας. Κάθε συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε είχε δύο ή και περισσότερες σταθερές μεταβλητές δημιουργώντας επιμέρους γινόμενα ή αθροίσματα. Έπειτα από πολλές δοκιμές καταλήξαμε στις επικρατέστερες συναρτήσεις οι οποίες και ακολουθούν (Εξ. 2.7-2.12):

- $C(\psi) = \alpha e^{b\psi}$ (2.7)

- $C(\psi) = \alpha e^{b\psi} + ce^{d\psi}$ (2.8)
- $C(\psi) = \alpha e^{(-(\frac{(\psi - b)}{c})^2)}$ (2.9)
- $C(\psi) = \alpha e^{-b\psi^2}$ (2.10)
- $C(\psi) = \alpha e^{-b\psi} \cos(\omega\psi)$ (2.11)
- $C(\psi) = \alpha(1 + b\psi)e^{-b\psi}$ (2.12)

  όπου ψ η σφαιρική απόσταση μεταξύ των σημείων

Οι τιμές των σταθερών μεταβλητών προσδιορίστηκαν με ελάχιστα τετράγωνα στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab, έτσι ώστε το αναλυτικό μοντέλο να προσαρμόζεται βέλτιστα στην εμπειρική συνάρτηση συμμεταβλητότητας.

Μοντέλα Gauss-Markov

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, υπάρχουν διάφοροι τύποι συναρτήσεων που χρησιμοποιούνται και έχουν παρόμοια αποτελέσματα με τις εμπειρικές συναρτήσεις. Ένα είδος συναρτήσεων που χρησιμοποιείται αρκετά είναι τα μοντέλα Markov (Jordan, 1972) (Εξ. 2.13-2.14).

$$C(r) = \sigma_0^2 \left(1 + \frac{r}{d}\right) e^{\left(\frac{-r}{d}\right)}$$ μοντέλο Markov δεύτερης τάξης (2.13)

$$C(r) = \sigma_0^2 \left(1 + \frac{r}{d} + \frac{r^2}{3d^2}\right) e^{\left(\frac{-r}{d}\right)}$$ μοντέλο Markov τρίτης τάξης (2.14)

Η εκτίμηση των παραμέτρων των μοντέλων Markov έγινε με συνόρθωση με τη μέθοδο των μικτών εξισώσεων. Στη συνέχεια θα δοθεί η δομή των βασικών πινάκων καθώς και οι σχέσεις με τις οποίες υλοποιείταιι η συνόρθωση ξεκινώντας από τους βασικούς πίνακες. Να αναφέρουμε ωστόσο στο σημείο αυτό πως η απόσταση d στην περίπτωση μας συμπίπτει με τη σφαιρική απόσταση ψ,

Συμβολισμοί

Δείκτες:

α: "αληθινές τιμές"

b: παρατηρήσεις

0: προσεγγιστικές τιμές

^: κατ' εκτίμηση τιμές

Βασικοί συμβολισμοί

x_i^a	άγνωστη παράμετρος
x_i^0	προσεγγιστική τιμή άγνωστης παραμέτρου
y_i^a	παρατηρούμενο μέγεθος
v_i	σφάλμα της μέτρησης
$y_i^b = y_i^a + v_i$	παρατήρηση (επηρεασμένο από σφάλμα εξαγόμενο μέτρησης)
y_i^0	προσεγγιστική τιμή παρατήρησης
$b_i = y_i^b - y_i^0$	ανηγμένη παρατήρηση
w_i	σφάλμα κλεισίματος
n	αριθμός παρατηρήσεων
m	αριθμός αγνώστων παραμέτρων
s	αριθμός εξισώσεων συνθηκών

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για τη συνόρθωση είναι αυτή των εξισώσεων συνθηκών η μορφή των οποίων δίνεται από την εξίσωση (Εξ. 2.15):

$$\mathbf{w} + \mathbf{Ax} - \mathbf{Bv} = 0 \,. \tag{2.15}$$

Μαθηματικό μοντέλο: $u(x^a, y^a) = 0$ (2.16)

$$\begin{aligned}
&u_1(x_1^a, x_2^2 \ldots, x_m^a, y_1^a, y_2^a, \ldots y_n^a) = 0 \\
&u_2(x_1^a, x_2^2 \ldots, x_m^a, y_1^a, y_2^a, \ldots y_n^a) = 0 \\
&\vdots \\
&u_s(x_1^a, x_2^2 \ldots, x_m^a, y_1^a, y_2^a, \ldots y_n^a) = 0
\end{aligned}$$

Γραμμικοποίηση: $u(x^0 + x, y^b - v) = 0 \rightarrow \mathbf{w} + \mathbf{Ax} - \mathbf{Bv} = \mathbf{0}$

Δομή των βασικών πινάκων w, A, B και P

$$\mathbf{w} = u(x^0, y^b) = \begin{bmatrix} u_1(x_1^0, x_2^0, \ldots, x_m^0, y_1^b, y_2^b, \ldots, y_n^b) \\ u_2(x_1^0, x_2^0, \ldots, x_m^0, y_1^b, y_2^b, \ldots, y_n^b) \\ \vdots \\ u_s(x_1^0, x_2^0, \ldots, x_m^0, y_1^b, y_2^b, \ldots, y_n^b) \end{bmatrix} \tag{2.17}$$

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^{\mathbf{T}}\mathbf{P}\mathbf{A} \tag{2.18}$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}^{\mathbf{T}}\mathbf{P}\mathbf{b} \tag{2.19}$$

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{N}^{-1}\mathbf{u} \tag{2.20}$$

$$\hat{\mathbf{x}}^{\mathbf{a}} = \mathbf{x}^{\mathbf{0}} + \hat{\mathbf{x}} \tag{2.21}$$

$$\mathbf{B} = \frac{\partial u}{\partial y}\Big|_{0,b} = \begin{array}{c} u_1 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ u_s \end{array} \begin{bmatrix} & & \vdots & & \\ & & \vdots & & \\ \cdots & \cdots & \frac{\partial u_i}{\partial y_j^a}\Big|_{0,b} & \cdots & \cdots \\ & & \vdots & & \\ & & \vdots & & \end{bmatrix} \tag{2.22}$$

Συνόρθωση:

$$\mathbf{M} = \mathbf{B}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{B}^{\mathbf{T}} \tag{2.23}$$

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^{\mathbf{T}}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{A} \tag{2.24}$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}^{\mathbf{T}}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{w} \tag{2.25}$$

$$\hat{\mathbf{x}}^{\mathbf{a}} = \mathbf{x}^{\mathbf{0}} + \hat{\mathbf{x}} \tag{2.26}$$

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί αναλυτικότερα η δομή των πινάκων όπως προκύπτει από τις γραμμικοποιήσεις και στις δύο συναρτήσεις.

<u>Μοντέλο Markov δεύτερης τάξης</u>

$$\mathbf{w} = u(x^0, y^b) = \begin{bmatrix} \sigma_0^2(1+\frac{r_1}{d_1})e^{\frac{-r_1}{d_1}} - C(r) \\ \sigma_0^2(1+\frac{r_2}{d_2})e^{\frac{-r_2}{d_2}} - C(r) \\ \vdots \\ \sigma_0^2(1+\frac{r_n}{d_m})e^{\frac{-r_n}{d_m}} - C(r) \end{bmatrix} \tag{2.27}$$

$$\mathbf{A} = \frac{\partial u}{\partial x}\Big|_{0,b} = \begin{array}{c} u_1 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ \vdots \\ u_s \end{array} \begin{bmatrix} 2\sigma_0(1+\frac{r_1}{d_1})e^{\frac{-r_1}{d_1}} & \sigma_0^2\left(\frac{r_1^2}{d_2^3}\right)e^{\frac{-r_1}{d_2}} \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ 2\sigma_0(1+\frac{r_s}{d_1})e^{\frac{-r_s}{d_1}} & \sigma_0^2\left(\frac{r_s^2}{d_2^3}\right)e^{\frac{-r_s}{d_2}} \end{bmatrix} \tag{2.28}$$

Ας δούμε τώρα πώς φτάσαμε στον υπολογισμό του πίνακα **A**.

Με βάση τον κανόνα της αλυσιδωτής παραγώγισης έχουμε

$$\frac{\partial}{\partial x}(uv) = v\frac{\partial u}{\partial x} + u\frac{\partial v}{\partial x},$$

$$\text{όπου } u = \sigma_0^2 \text{ και } v = \left(1+\frac{r}{d}\right)e^{\left(\frac{-r}{d}\right)} \tag{2.29}$$

Το διάνυσμα των αγνώστων $\mathbf{x}$ στην περίπτωση αυτή είναι τα σ_0 και d. Έτσι πρέπει να παραγωγίσουμε και τις δύο συναρτήσεις u, v ως προς τους δύο αυτούς αγνώστους. Η πρώτη στήλη του πίνακα Α προκύπτει εύκολα αφού έχουμε $\frac{\partial u}{\partial \sigma_0} = \frac{\partial}{\partial \sigma_0}\left(\sigma_0^2\right) = 2\sigma_0$. Αντίθετα για τον υπολογισμό των στοιχείων της δεύτερης στήλης οι υπολογισμοί είναι περισσότερο περίπλοκοι. Θα εφαρμόσουμε και εδώ την αλυσιδωτή παραγώγιση με τις δύο συναρτήσεις να είναι η $u = \sigma_0^2\left(1+\frac{r}{d}\right)$ και η $v = e^{\left(\frac{-r}{d}\right)}$ οι οποίες θα παραγωγιθούν ως προς τον άλλο άγνωστο την τιμή d.

Έτσι έχουμε: $d\ \frac{\partial}{\partial d}(uv) = v\frac{\partial u}{\partial d} + u\frac{\partial v}{\partial d}$

$$= e^{-\frac{r}{d}} \frac{\partial}{\partial d}\left(\frac{r}{d}+1\right)+\left(-\frac{r^2}{2d^2}+\frac{r}{d}+1\right)\left(\frac{\partial}{\partial d}\left(e^{-\frac{r}{d}}\right)\right)=$$

$$=\left(-\frac{r^2}{2d^2}+\frac{r}{d}+1\right)\left(e^{-\frac{r}{d}}\left(\frac{\partial}{\partial d}\left(-\frac{r}{d}\right)\right)\right)+e^{-\frac{r}{d}}\left(\frac{\partial}{\partial d}\left(\frac{r}{d}+1\right)\right)=$$

$$= e^{-\frac{r}{d}}\left(r\left(\frac{\partial}{\partial d}\left(\frac{1}{d}\right)\right)+\frac{\partial}{\partial d}(1)\right)+e^{-\frac{r}{d}}\left(\frac{r}{d}+1\right)\left(\frac{\partial}{\partial d}\left(-\frac{r}{d}\right)\right) \tag{2.30}$$

Ξέροντας την παράγωγο $\frac{1}{d} \to -\frac{1}{d^2}$ καταλήγουμε μετά από πράξεις στο αποτέλεσμα

$$= \frac{e^{-\frac{r}{d}}\left(r^2\right)}{d^3}$$

Για τον πίνακα **B** έχουμε:

$$\mathbf{B} = \frac{\partial u}{\partial y^a}\Big|_{0,b} = \begin{array}{c} u_1 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ \vdots \\ u_s \end{array} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_0^2 * \frac{-r}{d^2} * e^{-\frac{r}{d}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_0^2 \frac{-r}{d^2} e^{-\frac{r}{d}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_0^2 \frac{-r}{d^2} e^{-\frac{r}{d}} \end{bmatrix} \tag{2.31}$$

Τα στοιχεία του πίνακα αυτού προκύπτουν πιο εύκολα σε σχέση με αυτά του πίνακα Α. Τα στοιχεία της κύριας διαγωνίου ισούνται με -1 αφού είναι η παράγωγος του διανύσματος ως προς το μέγεθος C(r). Για τα υπόλοιπα μη μηδενικά στοιχεία του πίνακα προκύπτει πάλι από τον κανόνα της αλυσιδωτής παραγώγισης ότι είναι ίσα με

$$\sigma_0^2 \frac{\partial}{\partial r}\left(\left(1+\frac{r}{d}\right)e^{-\frac{r}{d}}\right) = \sigma_0^2 \frac{-r}{d^2} e^{-\frac{r}{d}}$$

<u>Μοντέλο Markov τρίτης τάξης</u>

$$\mathbf{w} = u(x^0, y^b) = \begin{bmatrix} \sigma_0^2(1+\frac{r_1}{d_1}+\frac{r_1^2}{3d_1^2})e^{\frac{-r_1}{d_1}} - C(r) \\ \sigma_0^2(1+\frac{r_2}{d_2}+\frac{r_2^2}{3d_2^2})e^{\frac{-r_2}{d_2}} - C(r) \\ \vdots \\ \sigma_0^2(1+\frac{r_n}{d_m}+\frac{r_n^2}{3d_m^2})e^{\frac{-r_n}{d_m}} - C(r) \end{bmatrix} \tag{2.32}$$

$$\mathbf{A} = \frac{\partial u}{\partial x}\Big|_{0,b} = \begin{array}{c} u_1 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ \vdots \\ u_s \end{array} \begin{bmatrix} 2\sigma_0(1+\frac{r_1}{d_1}+\frac{r_1^2}{3d_1^2})e^{\frac{-r_1}{d_1}} & \sigma_0^2\left(\frac{r_1^2}{3d_2^4}\right)\left(r_s+d_1\right)e^{\frac{-r_1}{d_2}} \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ 2\sigma_0(1+\frac{r_s}{d_1}+\frac{r_s^2}{3d_1^2})e^{\frac{-r_s}{d_1}} & \sigma_0^2\left(\frac{r_s^2}{3d_2^4}\right)\left(r_s+d_2\right)e^{\frac{-r_s}{d_2}} \end{bmatrix} \tag{2.33}$$

Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία όπως και για τον υπολογισμό του μοντέλου της δεύτερης τάξης και έτσι έχουμε:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uv) = v\frac{\partial u}{\partial x} + u\frac{\partial v}{\partial x}, \quad \textit{όπου } u = \sigma_0^2 \text{ και } v = \left(1+\frac{r}{d}+\frac{r^2}{3d^2}\right)e^{\left(\frac{-r}{d}\right)} \tag{2.34}$$

Το διάνυσμα των αγνώστων $\mathbf{x}$ στην περίπτωση αυτή είναι πάλι τα σ_0 και d. Έτσι πρέπει να παραγωγίσουμε και τις δύο συναρτήσεις u, v ως προς τους δύο αυτούς αγνώστους. Για την πρώτη στήλη του πίνακα **A** έχουμε $\frac{\partial u}{\partial \sigma_0} = \frac{\partial}{\partial \sigma_0}\left(\sigma_0^2\right) = 2\sigma_0$ ενώ για τη δεύτερη θα παραγωγίσουμε τις συναρτήσεις $u = \sigma_0^2\left(1+\frac{r}{d}+\frac{r^2}{3d^2}\right)$ και $v = e^{\left(\frac{-r}{d}\right)}$ ως προς τον άλλο άγνωστο την τιμή d.

Έτσι έχουμε: $d\ \frac{\partial}{\partial d}(uv) = v\frac{\partial u}{\partial d} + u\frac{\partial v}{\partial d}$

$$= e^{-\frac{r}{d}} \frac{\partial}{\partial d}\left(\frac{r^2}{3d^2}+\frac{r}{d}+1\right)+\left(\frac{r^2}{3d^2}+\frac{r}{d}+1\right)\left(\frac{\partial}{\partial d}\left(e^{-\frac{r}{d}}\right)\right)=$$

$$=\left(\frac{r^2}{3d^2}+\frac{r}{d}+1\right)\left(e^{-\frac{r}{d}}\left(\frac{\partial}{\partial d}\left(-\frac{r}{d}\right)\right)\right)+e^{-\frac{r}{d}}\left(\frac{\partial}{\partial d}\left(\frac{r^2}{3d^2}+\frac{r}{d}+1\right)\right)=$$

$$= e^{-\frac{r}{d}}\left(\frac{1}{3}r^2\left(\frac{\partial}{\partial d}\left(\frac{1}{d^2}\right)\right)+r\left(\frac{\partial}{\partial d}\left(\frac{1}{d}\right)\right)+\frac{\partial}{\partial d}(1)\right)+e^{-\frac{r}{d}}\left(\frac{r^2}{3d^2}+\frac{r}{d}+1\right)\left(\frac{\partial}{\partial d}\left(-\frac{r}{d}\right)\right) \tag{2.35}$$

Υπολογίζοντας του παραγώγους και μετά από πράξεις φτάνουμε στο αποτέλεσμα

$\dfrac{re^{-\frac{r}{d}}\left(\frac{r^2}{3d^2}+\frac{r}{d}+1\right)}{d^2}+e^{-\frac{r}{d}}\left(r\left(-\frac{1}{d^2}\right)-\frac{2r^2}{3d^3}\right)$ το οποίο μπορεί να γραφτεί και στη μορφή

$$\frac{r^2e^{-\frac{r}{d}}\left(r+d\right)}{3d^4}$$

Για τον πίνακα **B** έχουμε:

$$\mathbf{B}=\frac{\partial u}{\partial y^a}\Big|_{0,b}=\begin{array}{c} \\ u_1 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ \vdots \\ u_s \end{array}\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_0^2\left(-\frac{r^2}{3d^3}-\frac{r}{3d^2}\right)e^{-\frac{r}{d}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_0^2\left(-\frac{r^2}{3d^3}-\frac{r}{3d^2}\right)e^{-\frac{r}{d}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_0^2\left(-\frac{r^2}{3d^3}-\frac{r}{3d^2}\right)e^{-\frac{r}{d}} \end{bmatrix} \tag{2.36}$$

Για τα μη μηδενικά στοιχεία του πίνακα προκύπτει πάλι από τον κανόνα της αλυσιδωτής παραγώγισης ότι είναι ίσα με

$$\sigma_0^2\frac{\partial}{\partial r}\left(\left(1+\frac{r}{d}+\frac{r^2}{3d^2}\right)e^{-\frac{r}{d}}\right)=\sigma_0^2\frac{-re^{-\frac{r}{d}}\left(r+d\right)}{3d^3}=\sigma_0^2\left(-\frac{r^2}{3d^3}-\frac{r}{3d^2}\right)e^{-\frac{r}{d}} \tag{2.37}$$

Μοντέλα πολυωνύμων Legendre

Ένας άλλος τρόπος για να υπολογιστούν οι συμμεταβλητότητες μεταξύ δύο σημάτων s_1 και s_2 σε δύο διαφορετικά σημεία P_1 και P_2 τα οποία απέχουν μεταξύ τους απόσταση Δs_{12} αλλά και οι συμμεταβλητότητες σφάλματος μεγεθών που σχετίζονται με το πεδίο βαρύτητας αποτελεί η χρήση σφαιρικών αρμονικών συναρτήσεων. Έτσι τα μεγέθη που αναφέραμε παραπάνω μπορούν να εκφραστούν ως ένα άθροισμα γινομένων πολυωνύμων Legendre και των επιμέρους συμμεταβλητοτήτων:

$$C_{P_1 P_2} = \sum_{i=2}^{\infty} \sigma_i^{TT} P_i(\cos\psi) \tag{2.38}$$

όπου

σ_i^{TT} οι συμμεταβλητότητες του μεγέθους που περιγράφεται

ψ η σφαιρική απόσταση μεταξύ των δύο σημείων

Έτσι, η παραπάνω εξίσωση δεν εξαρτάται ούτε από τη θέση των δύο σημείων ούτε από το αζιμούθιο τους. Ο καθορισμός των συμμεταβλητοτήτων είναι απαραίτητος έτσι ώστε τα αποτελέσματα που θα πάρουμε να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα και να είναι χρήσιμα-αξιοποιήσιμα. Στην περίπτωση μεγεθών που σχετίζονται με τη δυναμική τοπογραφία της θάλασσας μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παραπάνω εξίσωση, με τις συμμεταβλητότητες να αναφέρονται σε μεγέθη που σχετίζονται με τη θαλάσσια τοπογραφία. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο συμμεταβλητοτήτων που κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας φίλτρα Butterworth τρίτου βαθμού σε συνδυασμό με ένα εκθετικό παράγοντα. Έτσι, το φάσμα της θαλάσσιας τοπογραφίας θεωρείται να έχει ίδιες ιδιότητες με το φάσμα του γεωειδούς (όμοια smoothness and infinite). Οι επιμέρους συμμεταβλητότητες δίνονται από την εξίσωση (Εξ. 2.39)

$$\sigma_i^{TT} = b\left(\frac{k_2^3}{k_2^3 + i_3} + \frac{k_1^3}{k_1^3 + i^3}\right)s^{i+1} \tag{2.39}$$

όπου οι μεταβλητές b, k_1, k_2, s επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να η μεταβλητότητα C_0 και το μήκος συσχέτισης ξ να ταυτίζονται με τις αντίστοιχες τιμές της εμπειρικής συνάρτησης.

Το μοντέλα αυτά συνορθώθηκαν με βάση τη μέθοδο των εξισώσεων παρατηρήσεων για την εκτίμηση των παραμέτρων τους. Στη συνέχεια θα δοθεί η δομή των βασικών πινάκων καθώς και οι σχέσεις με τις οποίες ολοκληρώνεται η συνόρθωση ξεκινώντας από τους βασικούς πίνακες. Οι βασικοί συμβολισμοί είναι ίδιοι με αυτούς των μεικτών εξισώσεων για αυτό θα περάσουμε κατευθείαν στο μαθηματικό μοντέλο. Η γενική εξίσωση των εξισώσεων παρατηρήσεων είναι η

$$\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{v} \tag{2.40}$$

Το μαθηματικό μοντέλο είναι το $y^a = f\left(x^a\right)$ δηλαδή

$$y_1{}^a = f_1\left(x_1{}^a, x_2{}^a, \ldots, x_m{}^a\right)$$

$$y_2{}^a = f_2\left(x_1{}^a, x_2{}^a, \ldots, x_m{}^a\right)$$

$$\vdots$$

$$y_n{}^a = f_n\left(x_1{}^a, x_2{}^a, \ldots, x_m{}^a\right) \tag{2.41}$$

και μέσω της γραμμικοποίησης καταλήγουμε στο

$$y^b = f\left(x^0 + x\right) + v \rightarrow b = Ax + v \tag{2.42}$$

ενώ η δομή των βασικών πινάκων b, A είναι

$$\mathbf{b} = \mathbf{y}^{\mathbf{b}} - \mathbf{y}^{\mathbf{0}} = \mathbf{y}^{\mathbf{b}} - \mathbf{f}(\mathbf{x}^{\mathbf{0}}) = \begin{bmatrix} y_1^b - y_1^0 \\ y_2^b - y_2^0 \\ \vdots \\ y_n^b - y_n^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1^b - f_1(x_1^0, x_2^0, \ldots, x_m^0) \\ y_2^b - f_2(x_1^0, x_2^0, \ldots, x_m^0) \\ \vdots \\ y_n^b - f_n(x_1^0, x_2^0, \ldots, x_m^0) \end{bmatrix} \tag{2.43}$$

$$\mathbf{A} = \frac{\partial y^a}{\partial x^a}\Big|_0 = \begin{array}{c} y^a{}_1 \\ \vdots \\ y_i{}^a \\ \vdots \\ y_n^a \end{array} \begin{bmatrix} & & \vdots & & \\ & & \vdots & & \\ \cdots & \cdots & \frac{\partial y^a{}_i}{\partial x_j^a}\Big|_0 & \cdots & \cdots \\ & & \vdots & & \\ & & \vdots & & \end{bmatrix} \tag{2.44}$$

Συνόρθωση:

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^{\mathbf{T}}\mathbf{P}\mathbf{A} \tag{2.45}$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}^{\mathbf{T}}\mathbf{P}\mathbf{b} \tag{2.46}$$

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{N}^{-1}\mathbf{u} \tag{2.47}$$

$$\hat{\mathbf{x}}^{\mathbf{a}} = \mathbf{x}^{\mathbf{0}} + \hat{\mathbf{x}} \tag{2.48}$$

Ας δούμε τώρα πως προκύπτουν οι επιμέρους πίνακες στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε τη συνάρτηση των πουωνύμων (στη συνέχεια η συνάρτηση αυτή θα συναντάται στην παρούσα εργασία και

με την ονομασία συνάρτηση Knudsen). Και στην περίπτωση αυτή εφαρμόστηκε ο κανόνας της αλυσιδωτής παραγώγισης όπως και παραπάνω. Στην περίπτωση αυτή η διαδικασία απαιτεί τον υπολογισμό πολλών πράξεων καθώς υπολογίζονται αθροίσματα πολλών όρων (ανάλογα με την τάξη του πολυωνύμου του Legendre που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί). Ωστόσο πρέπει να τονίσουμε πως η διαδικασία γίνεται δύο φορές καθώς αρχικά υπολογίζονται προσεγγιστικές τιμές και στη συνέχεια προχωρούμε στη διαδικασία της συνόρθωσης. Έτσι έχουμε:

$$\mathbf{b} = \mathbf{y^b} - \mathbf{y^0} = \sum_{i=1}^{100} \sigma_i^{TT} P_i(\cos\psi) - C^0$$

$\mu\varepsilon$

$$\sigma_i^{TT} = b\left(\frac{k_2^3}{k_2^3 + i^3} + \frac{k_1^3}{k_1^3 + i^3}\right) s^{i+1} \tag{2.49}$$

και για τον πίνακα Α έχουμε

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{100}\left(\frac{k_2^3}{k_2^3+i^3}+\frac{k_1^3}{k_1^3+i^3}\right)s^{i+1}P_i(\cos\psi_1) & \sum_{i=1}^{100}\frac{3i^3bk_2^2s^{i+1}}{\left(i^3+k_2^3\right)^2}P_i(\cos\psi_1) & \sum_{i=1}^{100}\frac{3i^3bk_1^2s^{i+1}}{\left(i^3+k_1^3\right)^2}P_i(\cos\psi_1) & \sum_{i=1}^{100}(i+1)bs^i\left(\frac{k_2^3}{k_2^3+i^3}+\frac{k_1^3}{k_1^3+i^3}\right)P_i(\cos\psi_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{i=1}^{100}\left(\frac{k_2^3}{k_2^3+i^3}+\frac{k_1^3}{k_1^3+i^3}\right)s^{i+1}P_i(\cos\psi_m) & \sum_{i=1}^{100}\frac{3i^3bk_2^2s^{i+1}}{\left(i^3+k_2^3\right)^2}P_i(\cos\psi_m) & \sum_{i=1}^{100}\frac{3i^3bk_1^2s^{i+1}}{\left(i^3+k_1^3\right)^2}P_i(\cos\psi_m) & \sum_{i=1}^{100}(i+1)bs^i\left(\frac{k_2^3}{k_2^3+i^3}+\frac{k_1^3}{k_1^3+i^3}\right)P_i(\cos\psi_m) \end{bmatrix} \tag{2.50}$$

2.4.2 Πρόγνωση με σημειακή προσαρμογή

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου μία αρκετά σημαντική διαδικασία στην ανάλυση δεδομένων είναι αυτή της πρόγνωσης τιμών. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι πρόγνωσης τιμών με αυτή της σημειακής προσαρμογής να χρησιμοποιείται ευρύτερα κυρίως για τον υπολογισμό μεγεθών του πεδίου βαρύτητας ή παραγώγων του. μέθοδος της σημειακής προσαρμογής (Least Square Collocation) παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι άλλων μεθόδων. Ειδικότερα:

- τα δεδομένα μπορεί να είναι είτε τυχαία κατανεμημένα είτε να βρίσκονται σε πλέγμα
- η πρόγνωση τιμών μπορεί να γίνει είτε σε τυχαία σημεία είτε σε σημεία που είναι επίσης κατανεμημένα σε πλέγμα
- το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι ανεξάρτητο από τον αριθμό των σημείων πρόγνωσης
- τα δεδομένα και τα προσδιοριζόμενα σήματα μπορεί να είναι ετερογενείς παρατηρήσεις
- προσφέρει τη βέλτιστη λύση, ακριβέστερη από οποιαδήποτε άλλη γραμμική προσέγγιση

Το μοναδικό της μειονέκτημα είναι πως απαιτεί την επίλυση συστήματος γραμμικών εξισώσεων με αριθμό εξισώσεων ίσο με τον αριθμό των αγνώστων. Ωστόσο, το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με διάφορες τεχνικές. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνική της "γρήγορης" σημειακής προσαρμογής (fast collocation) ή να χρησιμοποιηθούν πεπερασμένες συναρτήσεις συμμεταβλητότητας (finite covariance functions). Τέλος, μία άλλη επιλογή για την αντιμετώπιση του προβλήματος αποτελεί η χρήση θετικά ορισμένων πινάκων ή πινάκων με πολλά μηδενικά (positive definite, sparse matrices) (Αραμπέλος-Τζιαβός, 1997).

Ας δούμε τώρα τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος της πρόγνωσης. Υποθέτοντας ότι έχουμε διαθέσιμα δεδομένα ανωμαλιών της επιφάνειας της θάλασσας SLA_i τότε η πρόγνωση ανωμαλιών της επιφάνειας της θάλασσας με σημειακή προσαρμογή σε κάποιο σημείο *P* προκύπτει ως συνάρτηση των τιμών της ανωμαλίας σε άλλα σημεία και των αντίστοιχων πινάκων συμμεταβλητότητας και δίνεται από τις Εξ.2.51-2.52):

$$\tilde{\mathbf{sla}}_{\mathbf{P}} = \mathbf{C}^{\mathbf{T}}_{(\mathbf{sla_P},\mathbf{sla_i})}\mathbf{C}^{\mathbf{-1}}_{(\mathbf{sla_i},\mathbf{sla_j})}\mathbf{sla_i}, \tag{2.51}$$

$$sla_P = F(sla_1, sla_2, \ldots, sla_m). \tag{2.52}$$

Ενώ η γραμμική πρόγνωση (linear prediction) δίνεται από τον Εξ. 2.53

$$\tilde{s}la_P = a_1 sla_1 + a_2 sla_2 + \ldots + a_m sla_m, \tag{2.53}$$

και το σφάλμα της πρόγνωσης είναι η διαφορά μεταξύ της αρχικής τιμής και της τιμής της πρόγνωσης (Εξ. 2.54)

$$\varepsilon_P = sla_P - \tilde{s}la_P. \tag{2.54}$$

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί η διαδικασία με την οποία θα φτάσουμε στον υπολογισμό των συντελεστών *α* και στον τελικό τύπο της πρόγνωσης.

Το σφάλμα πρόγνωσης στο τετράγωνο είναι (Εξ. 2.55)

$$\varepsilon_P{}^2 = (sla_P - \tilde{s}la_P)^2 = sla_P^2 - 2\sum_i a_i sla_P sla_i + \sum_i \sum_j a_i a_j sla_i sla_j \tag{2.55}$$

και ο μέσος όρος του σφάλματος πρόγνωσης στο τετράγωνο (Εξ. 2.56)

$$M\left\{\varepsilon_P^2\right\} = M\left\{sla_P\right\} - 2\sum_{i=1}^{m} a_i M\left\{sla_P sla_i\right\} + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} a_i a_j M\left\{sla_i sla_j\right\} \tag{2.56}$$

όμως

$$M\left\{sla_P\right\} = C_0 \tag{2.57}$$

οπότε αντικαθιστώντας στην Εξ. 2.56

$$m_P^2 = C_0 - 2\sum_{i=1}^{m} a_i C_i + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} a_i a_j C_{ij} \tag{2.58}$$

όπου

$$m_P^2 = M\left\{\varepsilon_P^2\right\}, C_0 = M\left\{sla_P^2\right\}, C_{ij} = M\left\{sla_i sla_j\right\}, C_{Pj} = M\left\{sla_P sla_i\right\}$$

Στη συνέχεια θα προσδιορίσουμε τους συντελεστές α_i στην Εξ. 2.58 ώστε να πάρουμε τα βέλτιστα αποτελέσματα

$$\frac{\partial m_P^2}{\partial a_i} = -2C_{Pi} + 2\sum_{j=1}^{m} a_i C_{ij} \quad (i = 1, 2, \ldots, m)\}$$ ελαχιστοποίηση μ.σ.τ ~ συνθήκη ελαχιστοποίησης (2.59)

και έτσι καταλήγουμε σε ένα γραμμικό σύστημα m εξισώσεων με α_j αγνώστους (Εξ. 2.60)

$$\sum_{j=1}^{m} a_j C_{ij} = C_{Pi} \tag{2.60}$$

με τη λύση του συστήματος να είναι η (Εξ. 2.61)

$$a_j = \sum_{i=1}^{m} C_{ij}^{-1} C_{Pi} \tag{2.61}$$

με την πρόγνωση στο σημείο P να είναι πλέον (Εξ. 2.62)

$$\tilde{s}la_P = \sum_{j=1}^{m} a_j sla_j = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} C_{ij}^{-1} C_{Pi} sla_j \tag{2.62}$$

ή σε μορφή πινάκων η Εξ. 2.51.

2.5 Διαθέσιμα Δεδομένα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί και παραπάνω, η παρούσα εργασία εστιάζει στο σύνολο της περιοχής της Μεσογείου και ειδικότερα στην περιοχή μεταξύ των ορίων με γεωγραφικό πλάτος 30°≤φ≤50° και γεωγραφικό μήκος -10°≤λ≤40°. Μέσα σε αυτήν την περιοχή, τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ανωμαλιών της θάλασσας (SLA) μελετήθηκαν χρησιμοποιώντας αλτιμετρικά δεδομένα της αποστολής ENVISAT. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από όλη τη διάρκεια της αποστολής και συγκεκριμένα κατά την περίοδο (2002-2011). Τα δεδομένα αποκτήθηκαν μέσω της ιστοσελίδας του DEOS (Department of Earth

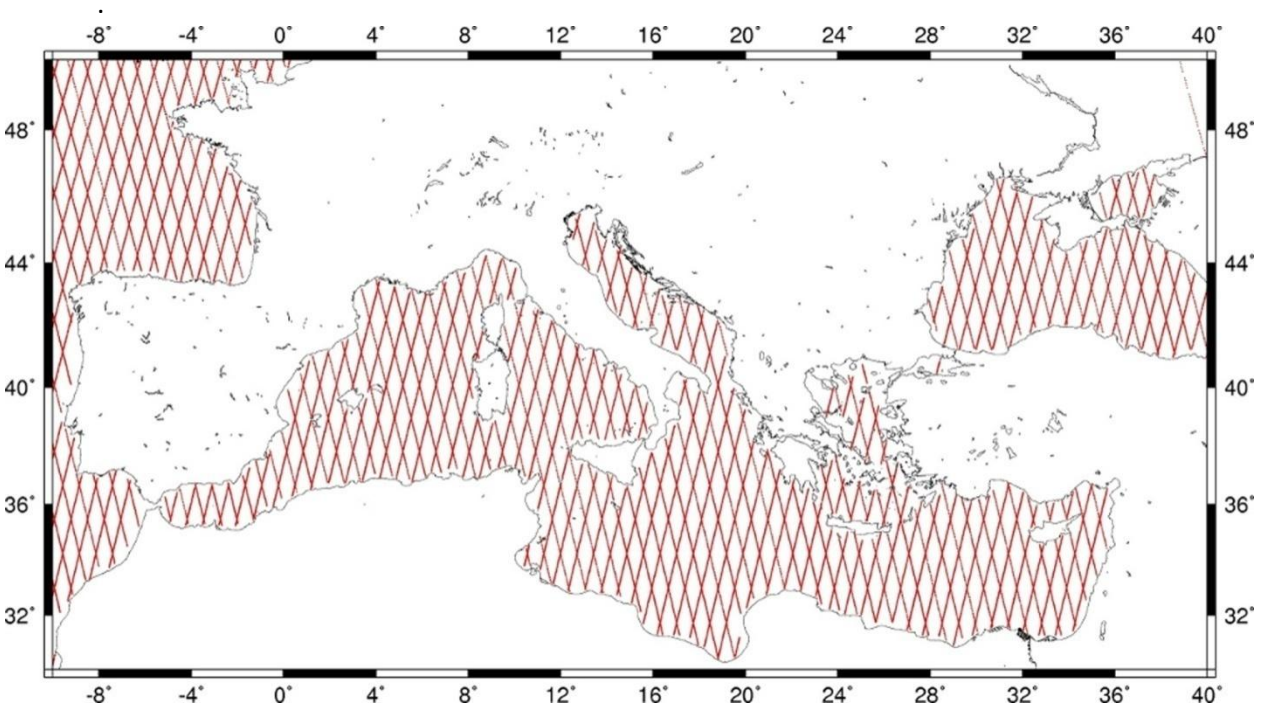
Observation and Space Systems) του Delft University of Technology (Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Ντελφτ στην Ολλανδία). Το Πανεπιστήμιο αυτό είναι υπεύθυνο για τη διανομή δεδομένων που καταγράφουν τα αλτίμετρα μιας σειράς δορυφόρων.Τα δεδομένα ήταν η τιμή της ανωμαλίας της επιφάνειας της θάλασσας (Sea Level Anomaly-SLA) σε m, οι τιμές των διορθώσεων για το σφάλμα της αντίστροφης βαρομετρικής διόρθωσης (τοπική, παγκόσμια, μέση, ολική), τα ύψη κύματος στις συχνότητες Ku και S και τέλος η ταχύτητα του ανέμου σε m/s και οι συνιστώσες της ταχύτητας U και V. Ακολουθεί μια τυπική μορφή του αρχείου όπως προέρχονται από το DEOS (http://rads.tudelft.nl).

 # RADS_ASC
 # Satellite = ENVISAT1
 # Phase = b
 # Cycle = 009
 # Pass = 0844
 # Equ_time = 559557710.925525 (25-Sep-2002 08:41:51)
 # Equ_lon = 19.559291
 # Col 1 = time rel. to equator passage [s]
 # Col 2 = latitude [degrees_north]
 # Col 3 = longitude [degrees_east]
 # Col 4 = sea level anomaly [m]
 # Col 5 = local inverse barometer correction [m]
 # Col 6 = local+global inverse barometer correction [m]
 # Col 7 = global inverse barometer correction [m]
 # Col 8 = total inverse barometer correction, MOG2D [m]
 # Col 9 = mean inverse barometer correction, MOG2D [m]
 # Col 10 = significant wave height (Ku) [m]
 # Col 11 = significant wave height (S) [m]
 # Col 12 = wind speed [m/s]
 # Col 13 = wind speed, model U-component [m/s]
 # Col 14 = wind speed, model V-component [m/s]
-847.327111 49.989329 33.355954 NaN 0.158 0.134 -0.024 -0.015 -0.058 NaN 5.923 20.616 NaN NaN

Ως επιφάνεια αναφοράς επιλέξαμε αυτή του γεωδυναμικού μοντέλου EGM2008. Επιπλέον, οι εγγραφές μας, είχαν διορθωθεί για την τροποσφαιρική επίδραση μέσω των μοντέλων ECMWF για τον ξηρό και MWR (NN) για τον υγρό παράγοντα ενώ η ιονοσφαιρική επίδραση της ατμόσφαιρας μειώθηκε μέσω της εξομαλυσμένης διόρθωσης διπλής συχνότητας (smoothed dual-frequency ionosphere correction). Τέλος, περιορίστηκαν τα σφάλματα τα οφειλόμενα στην επίδραση των παλιρροιών (Solid Earth-Pole-Load-Ocean tide) και το σφάλμα της διαφοράς της θαλάσσιας κατάστασης (Sea State Bias-SSB). Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να γίνουν οι διορθώσεις για τις παλίρροιες είναι τα *solid earth tide, GOT4.7 ocean tide, GOT4.7 load tide, pole tide*.

Τα δεδομένα του δορυφόρου μελετηθήκαν τόσο στο σύνολο της Μεσογείου (όλα τα περάσματα (passes) του δορυφόρου-cross track 2D case) αλλά κατά μήκος ενός περάσματος (along track 1D case). Στη

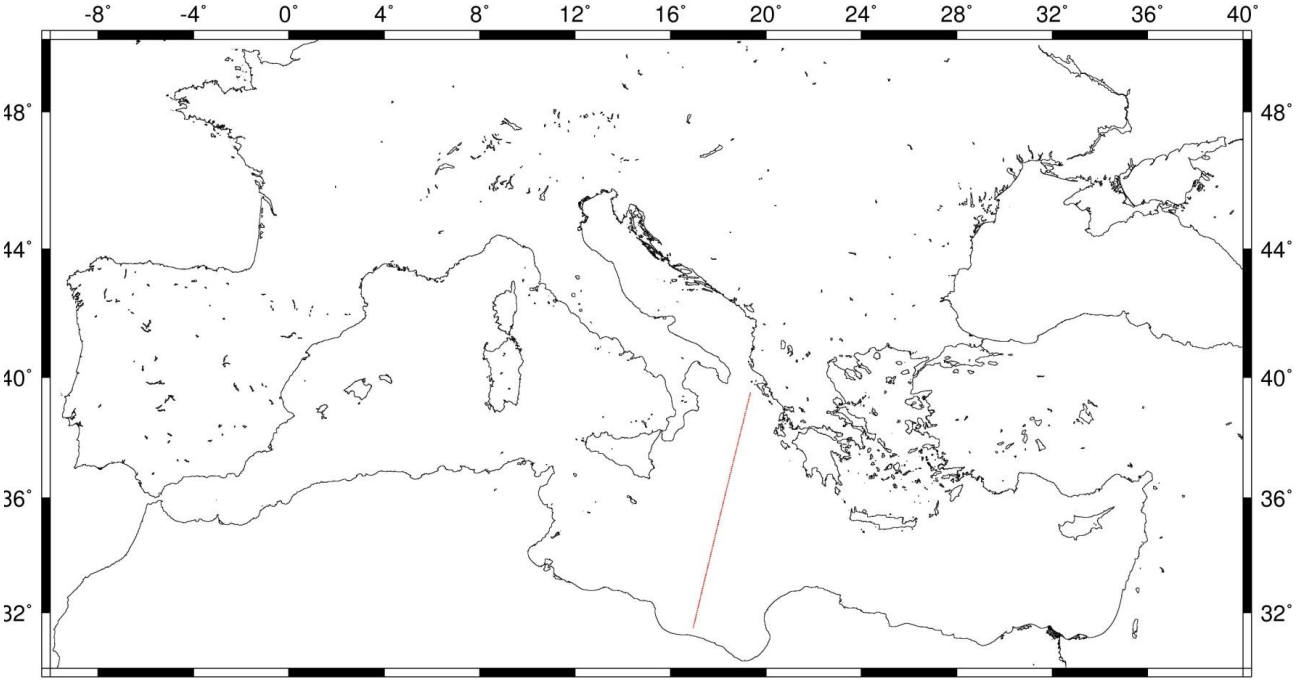
δεύτερη περίπτωση επιλέχθηκε το πέρασμα με το μεγαλύτερο μήκος στη Μεσόγειο (pass 444) έτσι ώστε να είναι διαθέσιμες όσο το δυνατόν περισσότερες παρατηρήσεις χωρίς να παρεμβάλλονται νησιά, περιοχές ξηράς, κ.λπ



Σχήμα 2.19: Το πλέγμα τιμών του δορυφόρου Envisat στη Μεσόγειο Θάλασσα.

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω Σχήμα το πλέγμα τιμών του δορυφόρου είναι αρκετά πυκνό. Καλύπτει όλη τη Μεσόγειο με κάθε κύκλο να έχει 1003 περάσματα. Η χωρική διακριτική ικανότητα του

ENVISAT μεταξύ διαδοχικών ιχνών (cross tracking spacing) είναι περίπου 75 km στον Ισημερινό.



Σχήμα 2.20: Το ίχνος της δορυφορικής διάβασης 444

Το ίχνος της διάβασης 444 όπως φαίνεται και από το παραπάνω Σχήμα ξεκινά βόρεια της Λιβύης, διασχίζει ένα κομμάτι της Μεσογείου, περνά ανατολικά της Μάλτας και δυτικά της Πελοποννήσου στο Ιόνιο πέλαγος και τελειώνει νοτιοδυτικά της Κέρκυρας. Συναντάται κατά μέσο όρο σε 11 κύκλους κατά τη διάρκεια ενός έτους και έχει περίπου 125 τιμές ανά πέρασμα.Στα δεδομένα που μελετήθηκαν δεν εφαρμόστηκε η αντίστροφη βαρομετρική διόρθωση καθώς παρατηρήθηκε πως οι τιμές των πρωτογενών δεδομένων δεν επηρεάζονταν αρκετά και επομένως δεν άλλαζε ούτε και η συνάρτηση συμμεταβλητότητας (το γεγονός αυτό θα παρουσιαστεί παρακάτω). Ωστόσο, πρέπει να τονίσουμε στο σημείο πως από τις τιμές κάθε περάσματος αφαιρούνταν κάθε φορά, η μέση τιμή των συνόλου των τιμών του περάσματος.Καθώς στα έτη 2002-2004 δεν παρατηρήθηκε ικανοποιητικός αριθμός τιμών του περάσματος 444, μελετήθηκαν αναλυτικότερα τα έτη 2005-2009. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ακραίες τιμές (ελάχιστη-μέγιστη) του περάσματος πριν και μετά την αφαίρεση της μέσης τιμής από τα δεδομένα. Οι ακραίες τιμές (αρχικές και νέες) δεν παρουσιάζονται απαραίτητα στο ίδιο σημείο του περάσματος ή ακόμη και στον ίδιο κύκλο.

Πίνακας 2.2: Τα στατιστικά των τιμών των ανωμαλιών της θάλασσας (SLA) σε cm

ΕΤΟΣ	ΠΛΗΘΟΣ ΤΙΜΩΝ	MIN	MAX	MIN_NEW	MAX_NEW
2005	1384	-30.5	22.8	-33.6	21.6
2006	1089	-32.4	26.5	-29.7	16.4
2007	1403	-43.6	26.2	-45.8	16.4
2008	1252	-41.3	33.1	-40.3	16.1
2009	1315	-33.7	29.6	-28.5	15.7

Όπως φαίνεται και από τον πίνακα η εφαρμογή αύτη της «διόρθωσης», με την αφαίρεση της μέσης τιμής, οι ακραίες τιμές επηρεάζονται κυρίως στη μέγιστη τιμή. Στα περισσότερα έτη η μέγιστη τιμή μειώνεται για περισσότερο από δέκα εκατοστά εκτός από το έτος 2005 όπου η μέγιστη τιμή μεταβάλλεται μόνο κατά 1.2 cm. Αντίθετα, όσον αφορά την ελάχιστη τιμή παρουσιάζονται μικρότερες μεταβολές. Η μέγιστη μεταβολή είναι περίπου 5 cm (το 2009) ενώ παρατηρούνται και έτη όπου το μέγεθος της ελάχιστης τιμής σε απόλυτη τιμή αντί να μειώνεται, αυξάνει (2005,2007).

2.6 Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε μια σύντομη αναφορά στη δορυφορική αλτιμετρία, τον τρόπο λειτουργίας του αλτιμετρικού δορυφόρου καθώς και μια ιστορική αναδρομή στις δορυφορικές αποστολές παρακολούθησης της θάλασσας. Στη συνέχεια ακολούθησε μια περιγραφή των ανωμαλιών της θάλασσας, της δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας και αναφορά στις συναρτήσεις συμμεταβλητότητας καθώς και στη διαδικασία πρόγνωσης με τη σημειακή προσαρμογή. Τέλος, το κεφάλαιο κλείνει με περιγραφή των διαθέσιμων δεδομένων που πρόκειται να μελετηθούν.

Όπως είδαμε, η παρακολούθηση και η μελέτη της μεταβολής της στάθμης της θάλασσας είναι το αντικείμενο πολλών ερευνών τις τελευταίες δεκαετίες τόσο σε ωκεανογραφικές όσο και γεωδαιτικές εφαρμογές. Η στατιστική συμπεριφορά των μεταβολών σε συνδυασμό με μεθόδους πρόγνωσης τιμών είναι μια σημαντικός τομέας στον οποίο επικεντρώνονται πλέον πολλές έρευνες και μελέτες. Η εργασία αυτή θα παρουσιάσει μερικές νέες μεθόδους και αποτελέσματα στον υπολογισμό αναλυτικών συναρτήσεων συμμεταβλητότητας για τις ανωμαλίες της επιφάνειας της θάλασσας στη Μεσόγειο έτσι ώστε να φτάσουμε σε συμπεράσματα όσον αφορά τα χαρακτηριστικά των τιμών που βασίζονται σε εμπειρικές ιδιότητες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια εκτενής περιγραφή και ανάλυση των διαδικασιών προσδιορισμού των εμπειρικών συναρτήσεων συμμεταβλητότητας τόσο στη μία διάσταση κατά μήκος της δορυφορικής τροχιάς (along-track, 1D case) όσο και στις δύο διαστάσεις (cross-track, 2D case). Στη συνέχεια θα γίνει αναφορά στον προσδιορισμό των αναλυτικών συναρτήσεων και για τις δύο περιπτώσεις μέσω εκθετικών μοντέλων, μοντέλων Gauss-Markov και μοντέλων σφαιρικών αρμονικών. Τέλος, το κεφάλαιο θα κλείσει με την παρουσίαση των διαδικασιών πρόγνωσης με τη σημειακή προσαρμογή στις δυο περιπτώσεις με τη χρήση των τριών μοντέλων που προαναφέρθηκαν. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειώσουμε πως για την επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν κώδικες που δημιουργήθηκαν στο πρόγραμμα Matlab μια ισχυρή γλώσσα αριθμητικού κατά βάση προγραμματισμού.

3.2 Διαδικασία προσδιορισμού εμπειρικών συναρτήσεων συμμεταβλητότητας

Για τη διαδικασία προσδιορισμού εμπειρικών συναρτήσεων συμμεταβλητοτήτων ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια. Αρχικά, για κάθε τιμή ανωμαλίας της θαλάσσιας επιφάνειας (SLA) υπάρχουν και οι αντίστοιχες συντεταγμένες, το γεωγραφικό πλάτος φ και το γεωγραφικό μήκος λ σε μοίρες- (π.χ. 39.842614,19.4618,-0.305-αρχικά το γεωγραφικό μήκος στη συνέχεια το γεωγραφικό πλάτος και έπειτα η τιμή της ανωμαλίας σε μέτρα). Για κάθε αρχείο δεδομένων , είτε πρόκειται για αρχείο με μία δορυφορική διάβαση (pass, περίπτωση μίας διάστασης) είτε πρόκειται για αρχείο που περιλαμβάνει τις τιμές όλων των διαβάσεων στη Μεσόγειο (περίπτωση δύο διαστάσεων) υπολογίζονται όλες οι δυνατές σφαιρικές αποστάσεις μεταξύ των σημείων μέσω της Εξ. 2.5 και καταχωρούνται στον αντίστοιχο τετραγωνικό πίνακα των αποστάσεων ***s***.

Οι τιμές των ανωμαλιών μετατρέπονται από m σε cm έτσι ώστε να μην υπάρχουν τιμές με πολύ μικρό μέγεθος μέσω της Εξ. 3.1

$$sla_i _ new = sla_i * 100 \tag{3.1}$$

και από τις τιμές αυτές απομακρύνουμε την κυρίαρχη τάση με την αφαίρεση της μέσης τιμής (βλ. Εξ. 3.2). Η μέση τιμή υπολογίζεται κάθε φορά μόνο από τα σημεία τα οποία χρησιμοποιούμε είτε για την along track είτε για την cross-track περίπτωση.

$$sla_i = sla_i - mean _ sla \tag{3.2}$$

Έπειτα οι αποστάσεις οι οποίες είχαν υπολογιστεί σε προηγούμενο βήμα με την Εξ. 2.5 ταξινομούνται σε κλάσεις ανάλογα με το μέτρο της απόστασης. Μετά από δοκιμές καταλήξαμε στη δημιουργία κλάσεων ανά 15 km. Βέβαια ο χρήστης του προγράμματος έχει τη δυνατότητα να ορίζει αυτός κάθε φορά την τιμή του βήματος. Η επιλογή αυτή εξαρτάται κάθε φορά από την κατανομή και τη θέση των σημείων τα οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της συνάρτησης συμμεταβλητότητας (ΣΣ). Στη συνέχεια για το σύνολο των σημείων που υπάρχουν μες στην κλάση υπολογίζεται το άθροισμα του γινόμενο των ανωμαλιών κάθε πιθανούς ζεύγους τιμών

$$Sum = \Sigma sla_i sla_j \tag{3.3}$$

Η τιμής της ΣΣ που αντιστοιχεί σε κάθε κλάση δίνεται από τον τύπο της Εξ. 3.4 στην οποία ουσιαστικά υπολογίζεται ο μέσος όρος των γινομένων όλων των ζευγών της κλάσης.

$$C_k = \frac{\Sigma sla_i sla_j}{N_k} \tag{3.4}$$

Υπολογίζοντας τις τιμές όλων των κλάσεων προκύπτει η εμπειρική ΣΣ. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε πως η τελική συνάρτηση προκύπτει "κόβοντας" την εμπειρική τιμή σε κάποιο μήκος μέχρι το οποίο η τιμή της συνάρτησης έχει αποδεκτά αποτελέσματα. Για παράδειγμα εφόσον το μήκος της διάβασης είναι συνολικά 400 km δεν έχει νόημα η ΣΣ να υπολογίζεται σε μήκος άνω της παραπάνω τιμής. Το γεγονός αυτό θα αναλυθεί περαιτέρω σε παραδείγματα που θα ακολουθήσουν στη συνέχεια.

3.2.1 Εμπειρικές συναρτήσεις along-track

Όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω, για τη δημιουργία εμπειρικών συναρτήσεων along track χρησιμοποιήθηκε η διάβαση με κωδικό 444. Ειδικότερα, δημιουργήθηκαν εμπειρικές συναρτήσεις με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα για το σύνολο των μηνών για τα έτη από 2005 ως και 2009. Σε κάθε έτος υπήρχαν διαθέσιμες τιμές για 9-11 μήνες καθώς ο δορυφόρος Envisat έχει περίοδο 35 ημερών. Επίσης, ο αριθμός των διαθέσιμων δεδομένων σε κάθε μήνα δεν ήταν σταθερός με τη μέση τιμή των εγγραφών να είναι περίπου 120. Έχουμε λοιπόν, εμπειρικές συναρτήσεις της διάβασης 444 οι οποίες θα μελετηθούν και για τις οποίες θα δημιουργηθούν αναλυτικές συναρτήσεις βάση μοντέλων που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.

3.2.2 Εμπειρικές συναρτήσεις cross-track

Για την περίπτωση των εμπειρικών συναρτήσεων cross-track εξετάστηκαν δυο διαφορετικές περιπτώσεις, για τα δεδομένα του δορυφόρου Envisat. Στην πρώτη, δημιουργήθηκε εμπειρική συνάρτηση για τα δεδομένα όλων των κύκλων (cycles) του έτους 2008 (κύκλος 65 7/1/2008 ως κύκλο 74 22/12/2008) τα οποία καλύπτουν ολόκληρη τη θαλάσσια περιοχή της Μεσογείου. Στη δεύτερη περίπτωση,

δημιουργήθηκε ένα "παράθυρο" στο θαλάσσιο χώρο της Μεσογείου με γεωγραφικό πλάτος 32°≤φ≤36° και γεωγραφικό μήκος 15°≤λ≤20°. Για τους κύκλους από 65 ως 70 με ημερομηνίες από 7/1/2008 ως 4/8/2008 εξετάστηκε πόσες τιμές ικανοποιούσαν το παραπάνω κριτήριο. Από τις 63360 εγγραφές που υπήρχαν στο σύνολο των παραπάνω κύκλων μόνο 3910 βρέθηκαν εντός των ορίων του συγκεκριμένου παραθύρου. Ουσιαστικά, η περίπτωση αυτή δημιουργήθηκε για να εξεταστεί κατά πόσο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η πρόγνωση με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων σε περιοχές όπου παρατηρείται έλλειψη δεδομένων. Τα αποτελέσματα αυτού του ελέγχου θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.

Στην περίπτωση των εμπειρικών συναρτήσεων cross-track πρέπει να σημειώσουμε και την εμπειρική συνάρτηση που δημιουργήθηκε για το μοντέλο DOT (Dynamic Ocean Topography) της M.H Rio (Rio et al., 2007). Για τη δημιουργία αυτής της εμπειρικής συνάρτησης ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία που έχουμε περιγράψει. 15557 τιμές της δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας ήταν διαθέσιμες σε ένα πλέγμα τιμών 1/8° x 1/8°. Όπως θα δούμε στη συνέχεια το βήμα των κλάσεων που επιλέχθηκε για αυτή τη συνάρτηση μετά από δοκιμές είναι αυτό των 250 km.

3.3 Προσδιορισμός αναλυτικών συναρτήσεων συμμεταβλητότητας

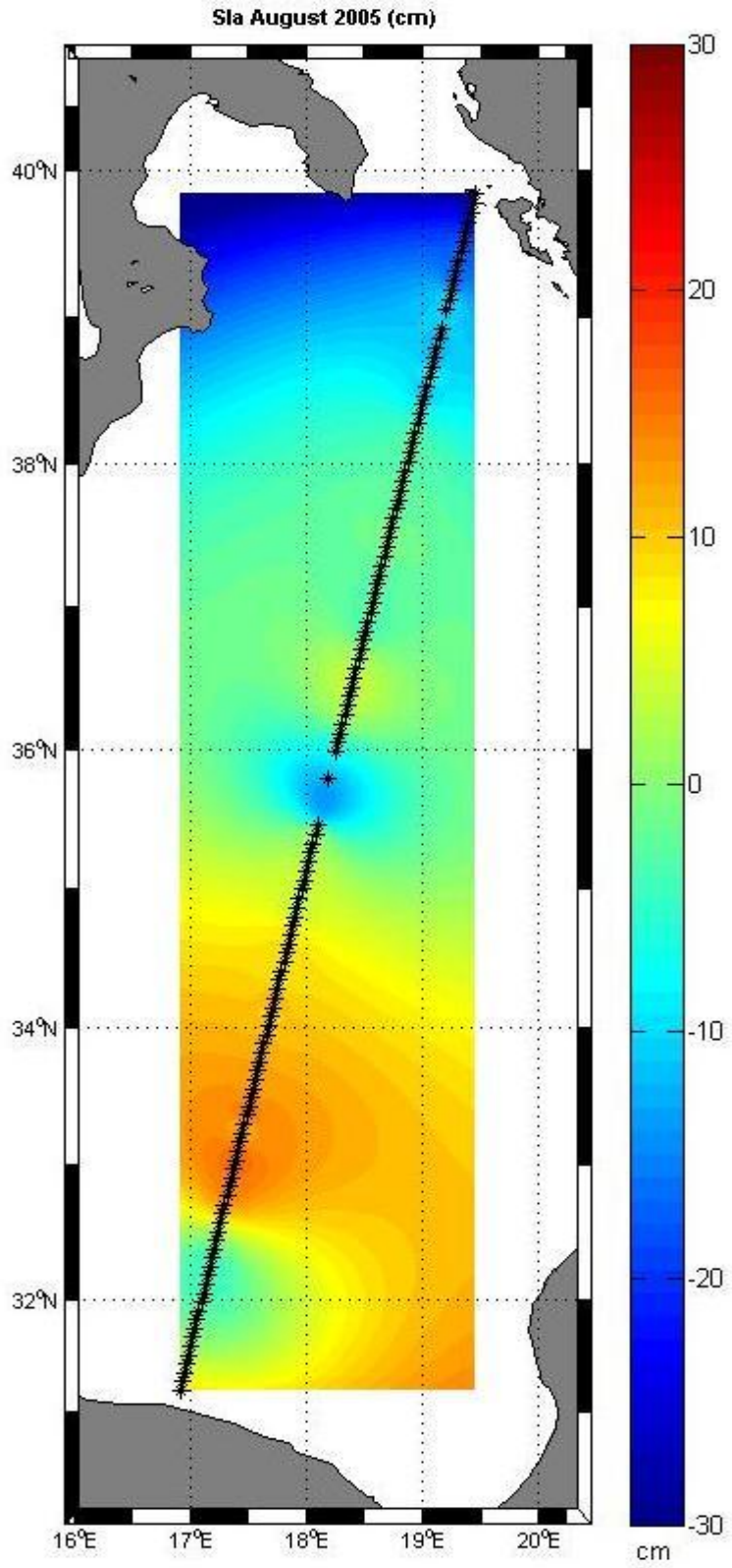
Με βάση τις εμπειρικές τιμές που προσδιορίστηκαν εξετάστηκε ποια αναλυτικά μοντέλα ΣΣ μπορούν να προσαρμοστούν στις εμπειρικές τιμές. Για την προσαρμογή (fitting) επιλέχτηκαν μοντέλα που μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

- εκθετικά μοντέλα
- μοντέλα Gauss-Markov και
- Μοντέλα σφαιρικών αρμονικών

Για την επιλογή των μοντέλων αυτών βασιστήκαμε σε διδακτικές σημειώσεις και θέματα που εκπονήθηκαν σε προπτυχιακό επίπεδο καθώς και ερευνητικές εργασίες (Jordan, 1972, Knudsen and Tscherning 2004). Η προσαρμογή των μοντέλων αυτών έγινε τόσο στην along track και την cross track περίπτωση μέσω προγραμμάτων που δημιουργήθηκαν στο Matlab. Για κάθε μοντέλο προσδιορίστηκαν οι αντίστοιχοι συντελεστές, οι τιμές των οποίων θα χρησιμοποιηθούν για την πρόγνωση τιμών μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων.

3.3.1 Αναλυτικές συναρτήσεις along track

Στην περίπτωση των αναλυτικών συναρτήσεων ΣΣ along track χρησιμοποιήθηκαν έξι εκθετικά μοντέλα, δύο μοντέλα Gauss-Markov της δεύτερης και της τρίτης τάξης και ένα μοντέλο σφαιρικών αρμονικών. Η εμπειρική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή που προσδιορίστηκε για τη διάβαση 444 τον Αύγουστο του 2005 (βλ. Σχήμα 3.1 & Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.1: Η δορυφορική διάβαση 444 τον Αύγουστο του 2005 και οι αντίστοιχες τιμές της SLA (cm)

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν με τους αντίστοιχους συντελεστές.

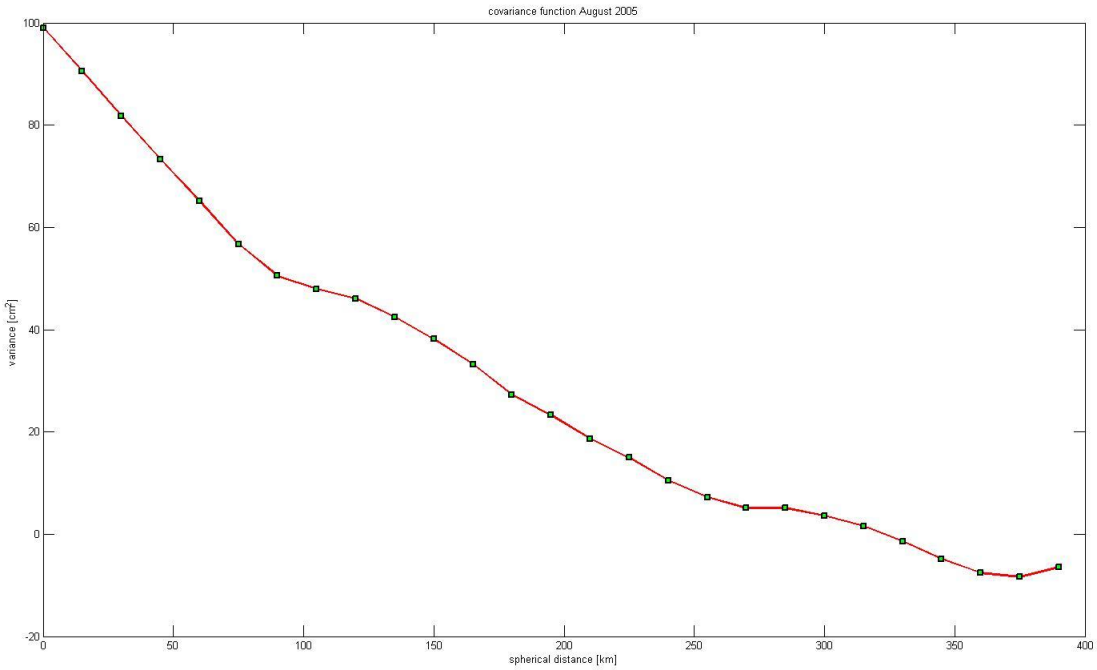
Εκθετικά μοντέλα

Όπως αναφέραμε χρησιμοποιήθηκαν έξι εκθετικά μοντέλα:

- $C(\psi) = \alpha e^{b\psi}$
- $C(\psi) = \alpha e^{b\psi} + c e^{d\psi}$
- $C(\psi) = \alpha e^{(-(\frac{(\psi - b)}{c})^2)}$
- $C(\psi) = \alpha e^{-b\psi^2}$
- $C(\psi) = \alpha e^{-b\psi} \cos(\omega\psi)$
- $C(\psi) = \alpha(1 + b\psi)e^{-b\psi}$

Στη συνέχεια τα παραπάνω μοντέλα θα αναφέρονται με την ονομασία μοντέλο Α, μοντέλο Β, μοντέλο Γ,..., μοντέλο ΣΤ.

Οι άγνωστοι συντελεστές α, b, c, d και ω προσδιορίστηκαν μέσα από την επιλογή cftool του προγράμματος matlab. Οι αναλυτικές συναρτήσεις που προέκυψαν θα παρουσιαστούν σε επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 3.2: Η εμπειρική ΣΣ τον Αύγουστο του 2005

Μοντέλα Gauss-Markov

Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκαν δύο μοντέλα. Το μοντέλο δευτέρου βαθμού καθώς και αυτό του τρίτου.

- $C(\psi) = \sigma_o^2 (1 + \frac{\psi}{d}) e^{-\frac{\psi}{d}}$ μοντέλο 2ου βαθμού
- $C(\psi) = \sigma_o^2 (1 + \frac{\psi}{d} + \frac{\psi^2}{3d^2}) e^{-\frac{\psi}{d}}$ μοντέλο 3ου βαθμού

όπου ψ η σφαιρική απόσταση και d το χαρακτηριστικό μήκος. Για να προσδιοριστεί η τιμή των αγνώστων παραμέτρων σ_o και d τα δύο παραπάνω μοντέλα συνορθώθηκαν με τη μέθοδο των μεικτών εξισώσεων. Χαρακτηριστικό των παραπάνω εξισώσεων είναι πως είναι θετικές σε όλο το πεδίο ορισμού τους.

Μοντέλα σφαιρικών αρμονικών

Τέλος όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενες ενότητες χρησιμοποιήθηκε και ένα μοντέλο σφαιρικών αρμονικών.

$$\sigma_i^{TT} = b(\frac{k_2^3}{k_2^3 + i_3} + \frac{k_1^3}{k_1^3 + i^3})s^{i+1} \tag{3.5}$$

Το μοντέλο αυτό είναι όμοιο με το αυτό που χρησιμοποίησαν το 1974 οι Tscherning, C.C. & Rapp, R.H για να περιγράψουν το διαταρακτικό δυναμικό. Προέκυψε από το συνδυασμό της Εξ. 3.5

$$C_{h^{SLA}h^{SLA}}(\psi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sigma_n^2 \left(h^{SLA}\right) P_n\left(cos\,\psi\right) \tag{3.6}$$

με ένα φίλτρου Butterworth 3^{ου} βαθμού για να προκύψει η εξίσωση (3.6). Το πολυώνυμο Legendre χρησιμοποιήθηκε μέχρι την τάξη 100 και οι τιμές των αγνώστων b, k_1, k_2 και s προσδιορίστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε οι τιμές του μοντέλου να συμφωνούν με τις εμπειρικές τιμές.

3.3.2 Αναλυτικές συναρτήσεις cross track

Στην περίπτωση των cross track συναρτήσεων ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με την περίπτωση των along track συναρτήσεων. Ως εμπειρικές τιμές χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές της ΣΣ που προέκυψε από τα δεδομένα του κύκλου 74 (11810 τιμές), η ΣΣ που δημιουργήθηκε από τα δεδομένα 5 κύκλων στην περιοχή με γεωγραφικά όρια 32°≤φ≤36° και 15°≤λ≤20° καθώς και η εμπειρική ΣΣ για το μοντέλο της δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας της Rio. Ωστόσο, αντίθετα με την περίπτωση των along track συναρτήσεων δε χρησιμοποιήθηκαν όλες οι πιθανές εκθετικές συναρτήσεις (επιλέχτηκαν τέσσερα από τα έξι μοντέλα, αυτά με την καλύτερη προσαρμογή), δεν χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο σφαιρικών αρμονικών αλλά χρησιμοποιήθηκαν και τα δύο μοντέλα του Gauss-Markov.

Εκθετικά μοντέλα

Από τα έξι μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στην προηγούμενη περίπτωση επιλέχτηκαν τέσσερα, αυτά που προσαρμόστηκαν καλύτερα στην εμπειρική συνάρτηση. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα Α, Β, Ε και ΣΤ.

Τα αλλά δύο μοντέλα απορρίφθηκαν καθώς παρά τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, η μορφή των εξισώσεων δεν προσέγγιζε ικανοποιητικά αυτήν της εμπειρικής ΣΣ με αποτέλεσμα η πρόγνωση τιμών που είναι ο απώτερος στόχος της παρούσης εργασίας να ήταν εξαρχής προβληματικός.

Μοντέλα Gauss-Markov

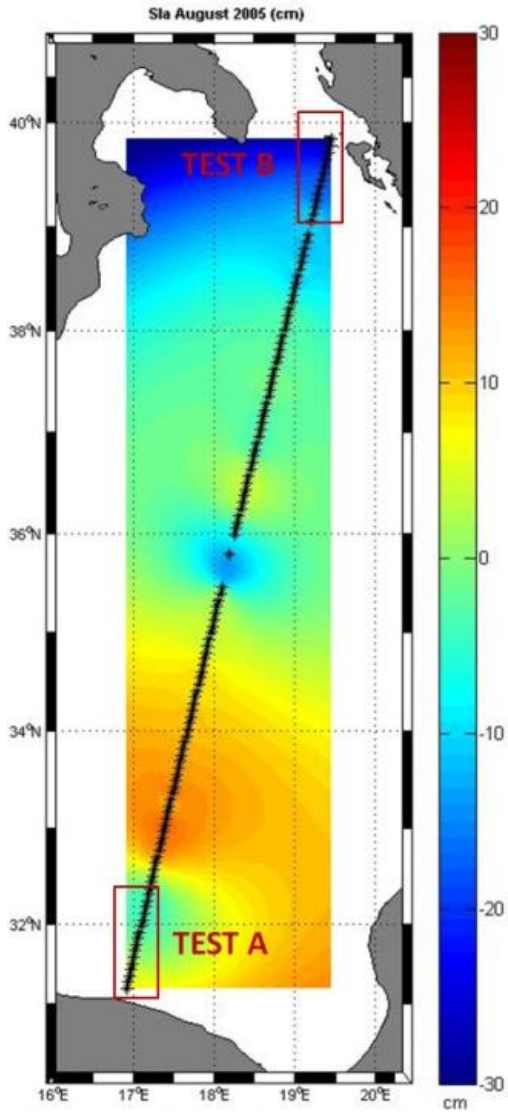
Και τα δύο μοντέλα αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιήθηκαν εκ νέου για τη δημιουργία αναλυτικών ΣΣ. Όπως θα διαπιστώσουμε και από τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν στο επόμενο το μοντέλο τρίτου βαθμού όσον αφορά τα χαρακτηριστικά μεγέθη μιας ΣΣ, δηλαδή το μήκος συσχέτισης ξ και τη μεταβλητότητα C_0 προσέγγιζε καλύτερα τις τιμές των αντίστοιχων μεγεθών της εμπειρικής ΣΣ.

3.4 Διαδικασία Πρόγνωσης με σημειακή προσαρμογή

Ένα ακόμη στοιχείο που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία είναι η πρόγνωση τιμών μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων. Στη μέθοδο αυτή είναι αναγκαία η γνώση των πινάκων μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των δεδομένων ώστε να γίνει η πρόγνωση των σημάτων. Οι αναλυτικές ΣΣ και οι συντελεστές των μοντέλων που προσδιορίσαμε, χρησιμοποιήθηκαν ώστε να προσδιοριστούν τα επιμέρους στοιχεία των πινάκων μεταβλητοτήτων-συμμεταβλητοτήτων. Για να αξιολογηθούν οι ακρίβειες των μοντέλων που έχουμε προσδιορίσει έγιναν έλεγχοι τόσο στην περίπτωση των along track συναρτήσεων όσο και σε αυτή των cross track. Ουσιαστικά, η ποσότητα που ελέγχουμε είναι το σφάλμα πρόγνωσης μέσω της Εξ. 2.54. Πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι τόσο στην περίπτωση των along track συναρτήσεων όσο και σε αυτή των cross track και τα αποτελέσματα τους θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο.

3.4.1 Πρόγνωση along track

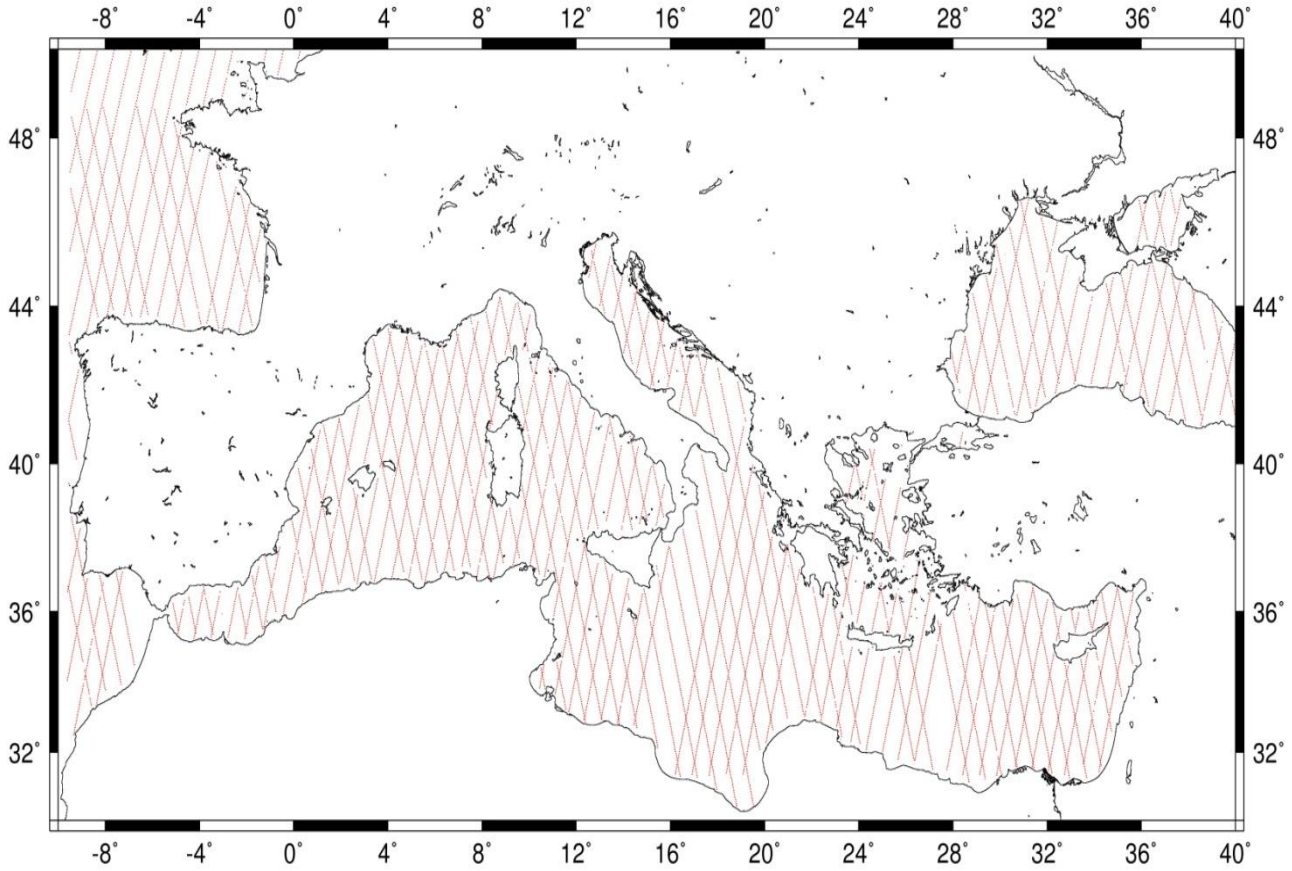
Στην περίπτωση των along track συναρτήσεων (όπου μελετήθηκε η δορυφορική διάβαση 444 τον Αύγουστο του 2005) έγιναν τρεις επιμέρους έλεγχοι για το σύνολο των αναλυτικών ΣΣ που προσδιορίστηκαν. Στον πρώτο έγινε πρόγνωση στις πρώτες είκοσι τιμές του pass (TEST A), στο δεύτερο έγινε πρόγνωση στις είκοσι τελευταίες εγγραφές (TEST B) και τέλος έγινε πρόγνωση σε κάθε δεύτερο σημείο του pass χρησιμοποιώντας ως δεδομένα τα υπόλοιπα (TEST C).



Σχήμα 3.3: Οι δύο έλεγχοι που έγιναν στην along track περίπτωση TEST A & TEST B

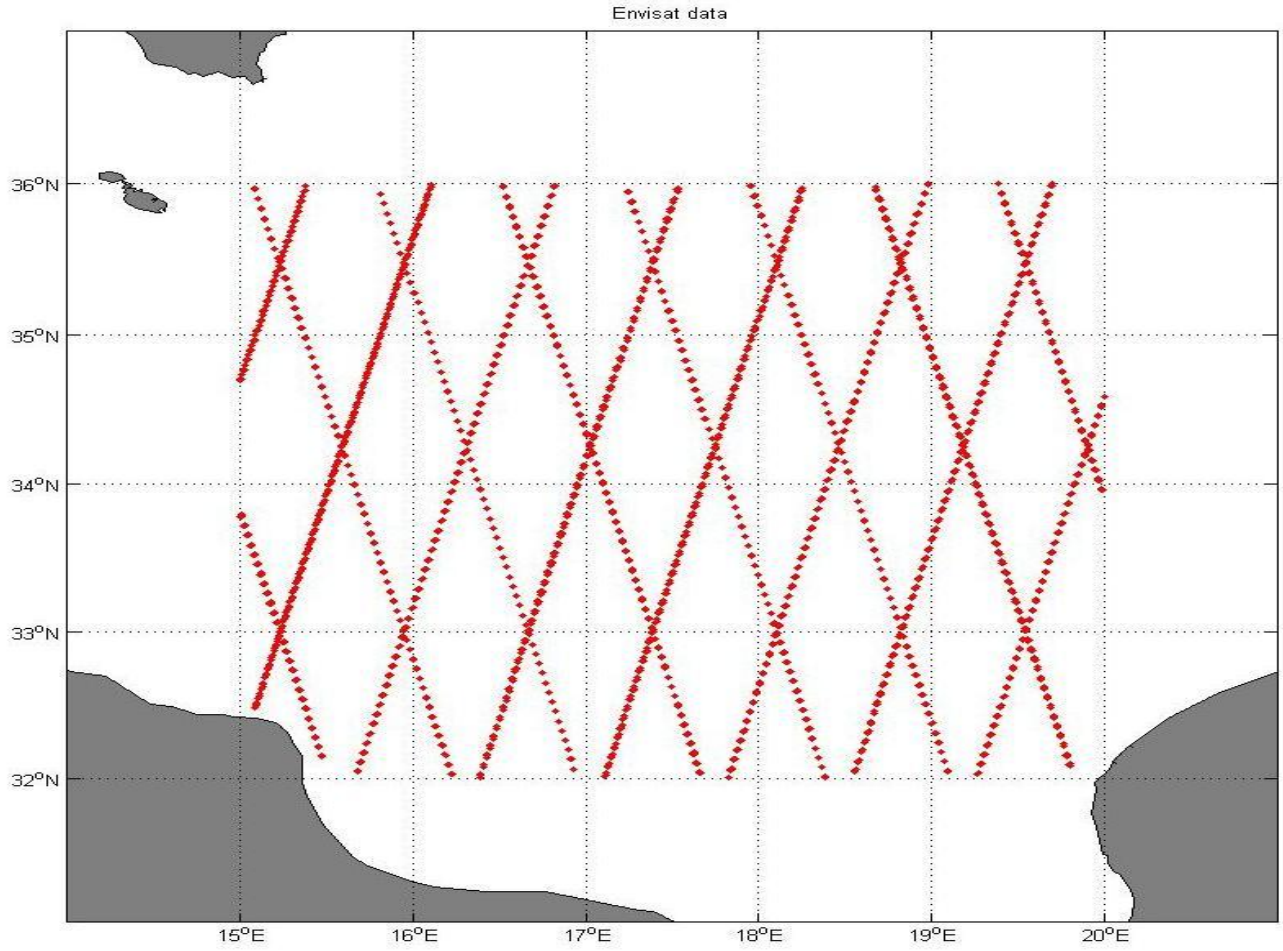
3.4.2 Πρόγνωση cross track

Όσον αφορά την περίπτωση των αναλυτικών συναρτήσεων για την cross track πραγματοποιήθηκε μόνο ο τρίτος έλεγχος της along track περίπτωσης, δηλαδή προσδιορίστηκαν σήματα σε κάθε δεύτερο σημείο. Ο έλεγχος αυτός έγινε για τις 4 περιπτώσεις των εκθετικών συναρτήσεων και τα δύο μοντέλα Gauss-Markov δηλαδή για όσα μοντέλα προσδιορίστηκαν αναλυτικές ΣΣ.



Σχήμα 3.4: Το πλέγμα τιμών για τον κύκλο 74

Η πρόγνωση έγινε και για τα δεδομένα του κύκλου 74 (Σχήμα 3.4,πάνω) αλλά και για τα δεδομένα των κύκλων 65-70 στην περιοχή 32°≤φ≤36°, 15°≤λ≤20° (Σχήμα 3.5, κάτω)



Σχήμα 3.5: Το πλέγμα τιμών του Envisat, κύκλοι 65-70

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

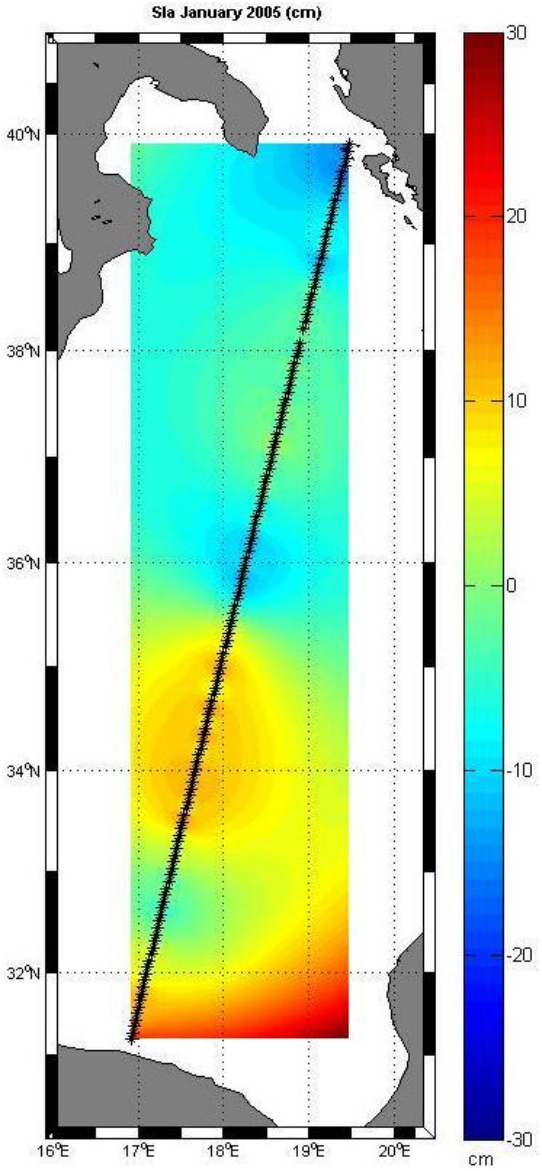
4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν εκτενώς τα αποτελέσματα της μεταπτυχιακής εργασίας αναφορικά με τον υπολογισμό των αναλυτικών ΣΣ και την πρόγνωση με σημειακή προσαρμογή. Αρχικά, παρουσιάζεται η διακύμανση των τιμών της ανωμαλίας της θαλάσσιας επιφάνειας (SLA) της διάβασης 444 για όλους τους μήνες από το 2005 ως το 2009. Στη συνέχεια αναφέρονται οι εμπειρικές ΣΣ που υπολογίστηκαν για τη συγκεκριμένη δορυφορική διάβαση (along track). Ειδικότερα, θα γίνει σύγκριση των τιμών της SLA καθώς και της εμπειρικής ΣΣ μετά την εφαρμογή της αντίστροφης βαρομετρικής διόρθωσης στις διαθέσιμες τιμές της διάβασης 444 για το 2009. Όπως θα δούμε, η εφαρμογή της διόρθωσης δεν επηρέασε τις τιμές και για αυτό δεν εφαρμόστηκε στα πρωτογενή δεδομένα. Θα παρουσιαστούν οι εμπειρικές ΣΣ για την cross track περίπτωση και για το μοντέλο της δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας της Rio, ενώ ειδική αναφορά θα γίνει στις αναλυτικές ΣΣ που έχουν προσδιοριστεί με όλα τα διαθέσιμα μοντέλα και στις δυο περιπτώσεις. Τέλος, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της πρόγνωσης, ενώ το κεφάλαιο θα κλείσει με τη διερεύνηση ενδεχόμενης συσχέτισης των τιμών της μεταβλητότητας της διάβασης444 με τις τιμές των δεικτών SOI, NAO και MOI.

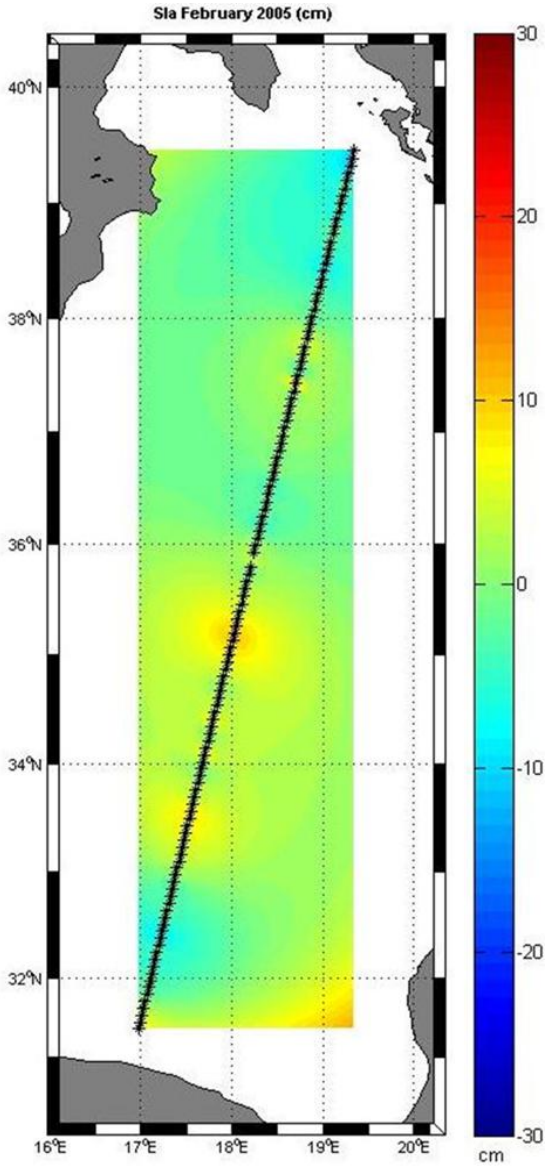
4.2 Απεικόνιση τιμών SLA για τη δορυφορική διάβαση (pass) 444

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν οι μηνιαίες τιμές ανωμαλιών της θαλάσσιας επιφάνειας της διάβασης 444 για την περίοδο 2005-2009. Με βάση τις τιμές που είχαμε στη διάθεση μας κάναμε πρόγνωση τιμών σε όλη την περιοχή γύρω από το ίχνος της διάβασης δηλαδή την περιοχή με γεωγραφικά όρια min$\phi \leq \phi \leq$maxϕ και min$\lambda \leq \lambda \leq$ maxλ. Η πρόγνωση έγινε με τη μέθοδο Delaunay Triangulation στο περιβάλλον του Matlab με βήμα 0.01° κατά γεωγραφικό πλάτος και μήκος. Σε όλα τα σχήματα έχει τοποθετηθεί η ίδια χρωματική κλίμακα τιμών ώστε να είναι πιο εύκολη η ερμηνεία τους και η εξαγωγή συμπερασμάτων. Τα σχήματα θα παρουσιάζονται ανά έτος και ο αριθμός τους δεν ο ίδιος για κάθε χρονιά. Αιτία για το γεγονός αυτό είναι επαναληπτική περίοδος των 35 ημερών της τροχιάς που παρουσιάζει ο δορυφόρος αλλά και ορισμένα τεχνικά προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά καιρούς στο αλτίμετρό του.

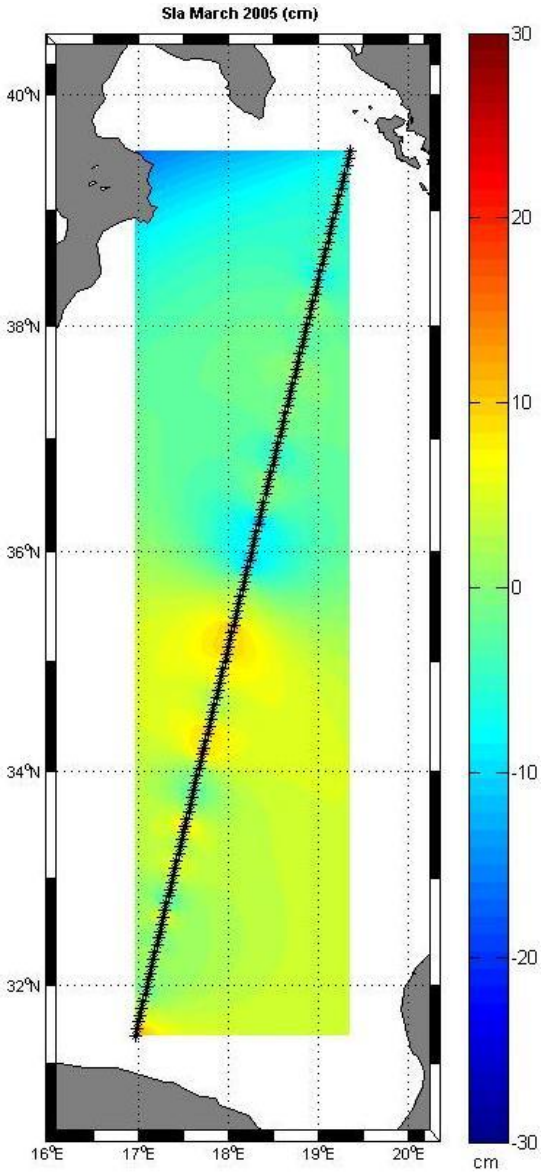
Τιμές SLA για το 2005



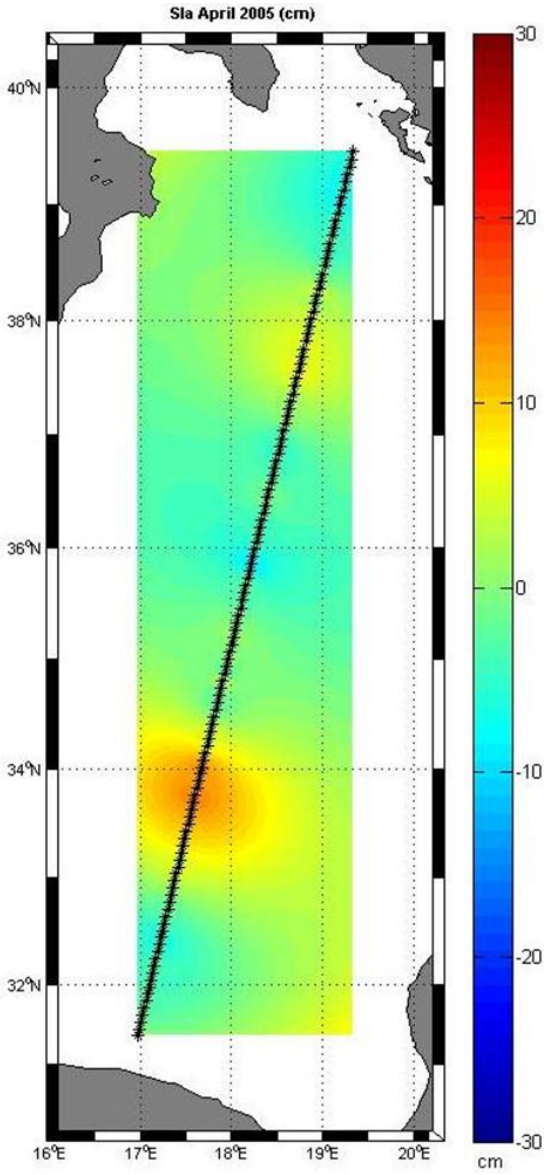
Σχήμα 4.1: Τιμές SLA (cm) τον Ιανουάριο 2005



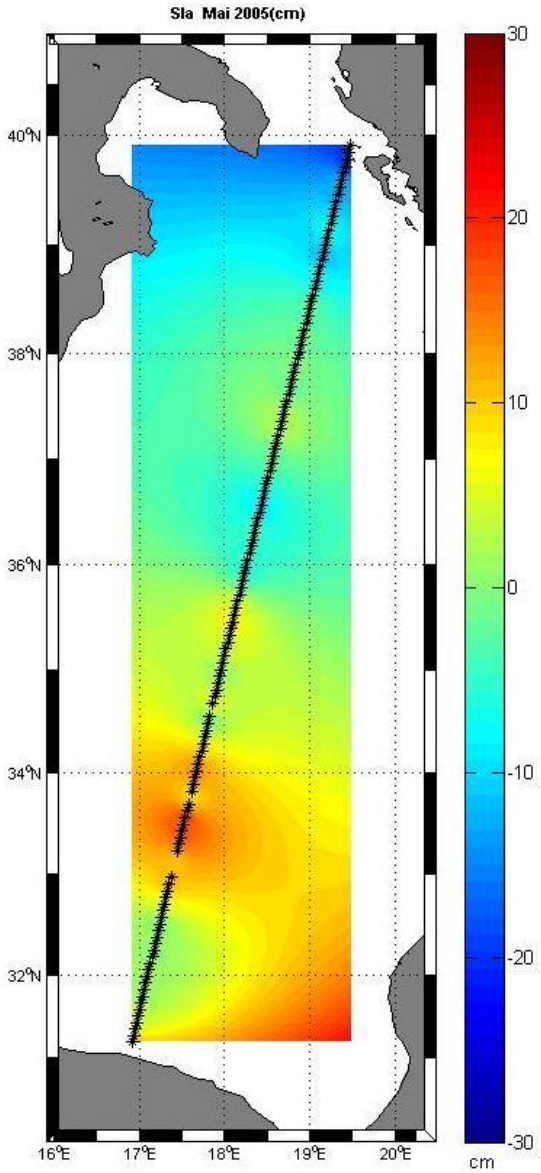
Σχήμα 4.2: Τιμές SLA (cm) το Φεβρουάριο 2005



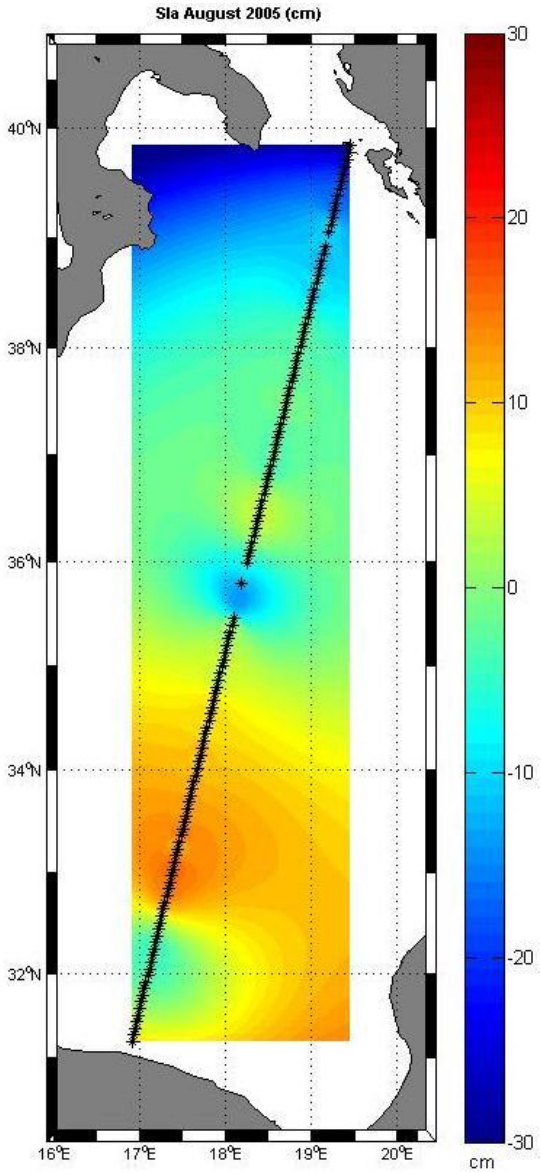
Σχήμα 4.3: Τιμές SLA (cm) το Μάρτιο 2005



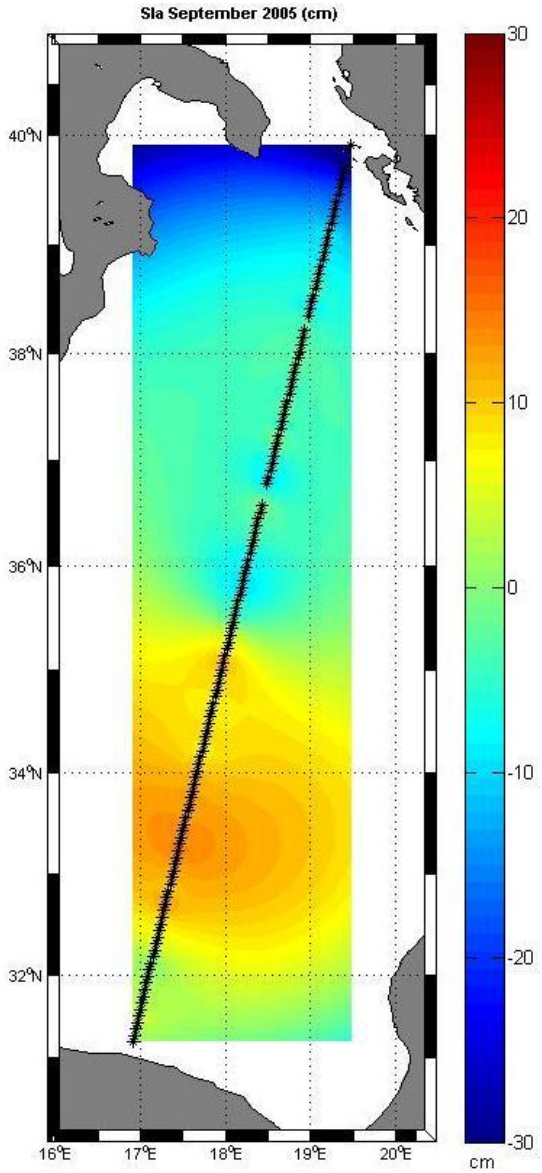
Σχήμα 4.4: Τιμές SLA (cm) τον Απρίλιο 2005



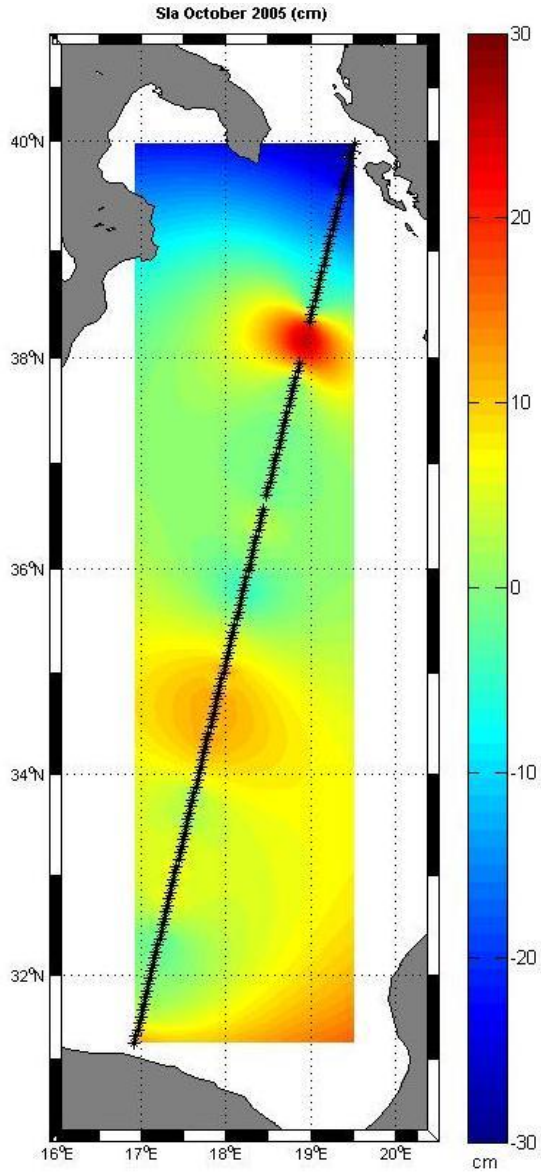
Σχήμα 4.5: Τιμές SLA (cm) το Μάιο 2005



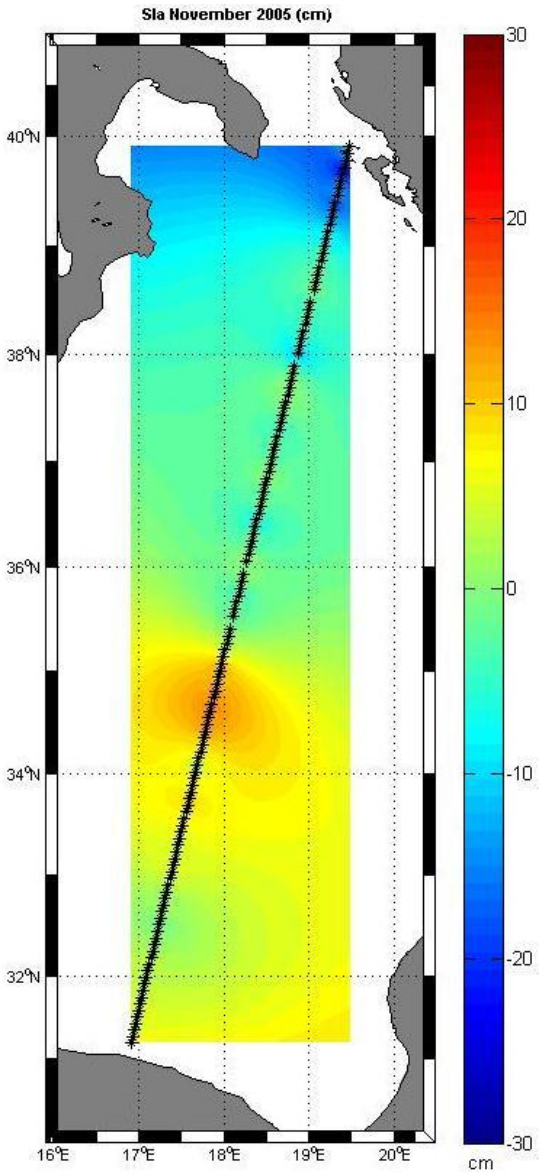
Σχήμα 4.6: Τιμές SLA (cm) τον Αύγουστο 2005



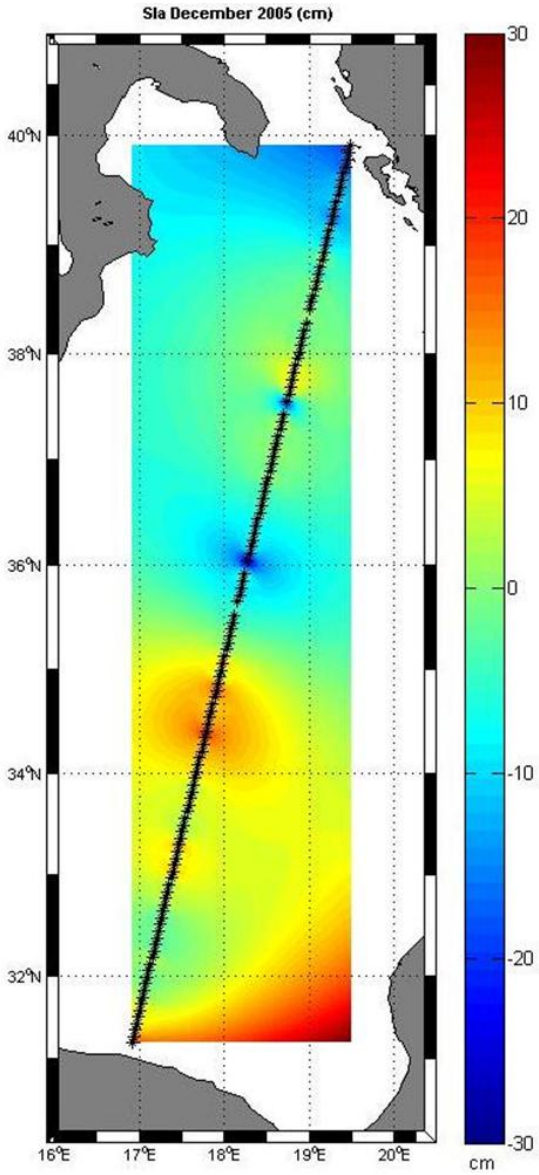
Σχήμα 4.7: Τιμές SLA (cm) το Σεπτέμβριο 2005



Σχήμα 4.8: Τιμές SLA (cm) τον Οκτώβριο 2005



Σχήμα 4.9: Τιμές SLA (cm) το Νοέμβριο 2005



Σχήμα 4.10: Τιμές SLA (cm) το Δεκέμβριο 2005

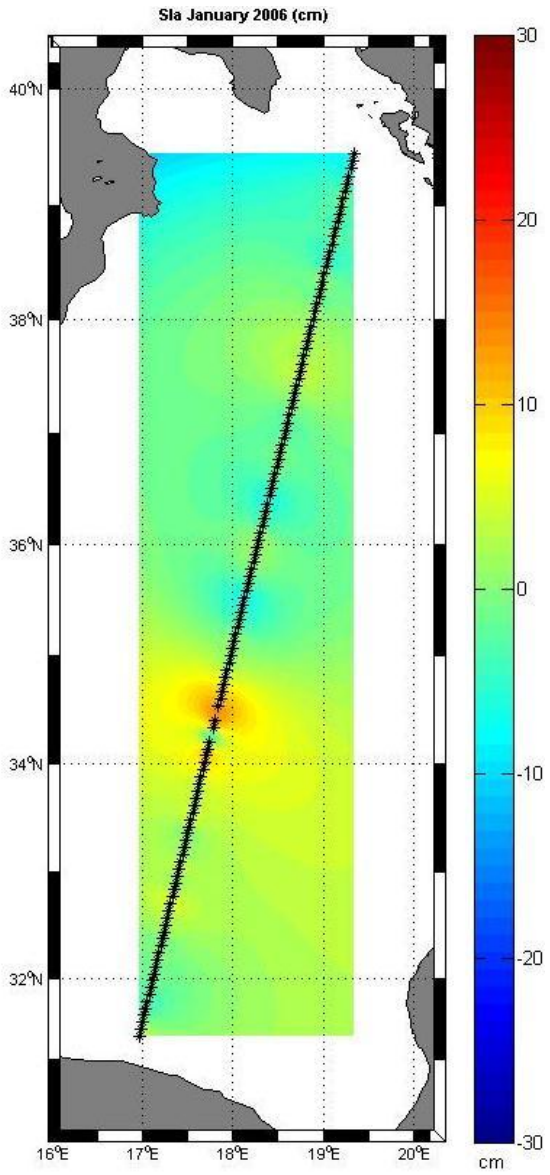
Πίνακας 4.1: Στατιστικά τιμών SLA (cm) για το έτος 2005

min	max	mean	std
-30.5	22.8	0.75	±8.75

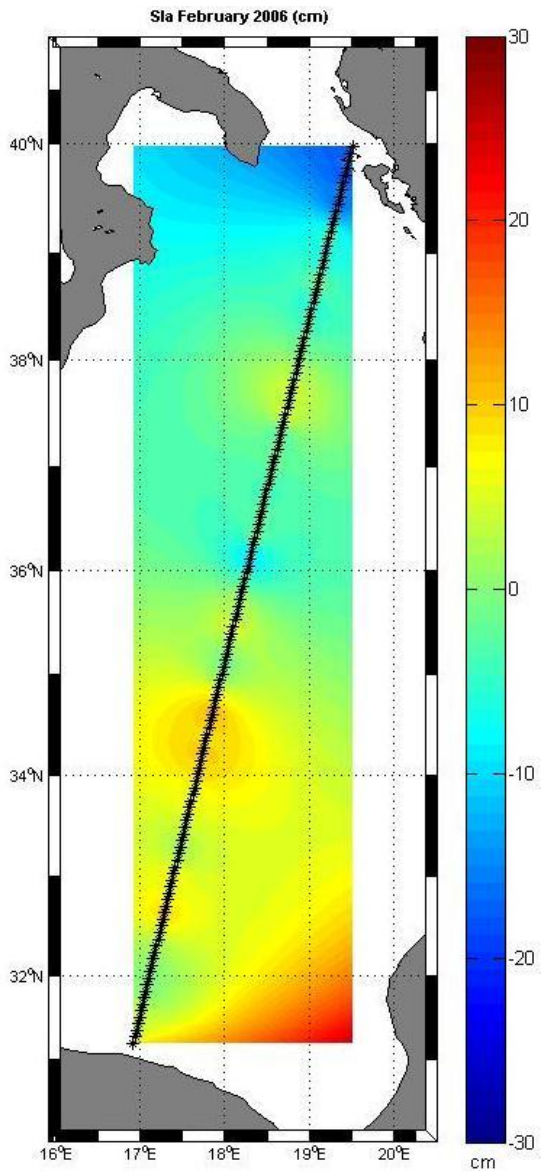
Μελετώντας τα παραπάνω σχήματα, μπορούμε να διατυπώσουμε το συμπέρασμα πως κατά μήκος των δεδομένων της διάβασης ορίζονται δύο περιοχές. Μία στο νότο με συντεταγμένες 17° ≤ λ ≤ 19.5° και 31.5° ≤ ϕ ≤ 36° όπου παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές της ανωμαλίας της θαλάσσιας επιφάνειας και μία στο βορρά όπου οι τιμές είναι μικρότερες. Στην πλειοψηφία των σχημάτων όπου δεν παρατηρούνται

ασυνέχειες των δεδομένων, η μεταβολή των τιμών είναι ομαλή αντίθετα με τα Σχήματα 4.5, 4.6, 4.8 & 4.10 όπου η έλλειψη δεδομένων δημιουργεί τοπικά μέγιστα και ελάχιστα. Επίσης, στην ΝΑ και ΒΔ περιοχή του Σχήματος, περιοχές που βρίσκονται μακριά από τα δεδομένα, εμφανίζονται ακραίες τιμές που οφείλονται στην έλλειψη δεδομένων και στην εσφαλμένη πρόγνωση. Τέλος, όπως θα δούμε και στις ΣΣ που θα παρουσιαστούν σε επόμενη ενότητα, η SLA εμφανίζει υψηλές τιμές τους χειμερινούς μήνες, χαμηλότερες την άνοιξη και το καλοκαίρι με τις μέγιστες τιμές να παρουσιάζονται πιο συχνά το φθινόπωρο.

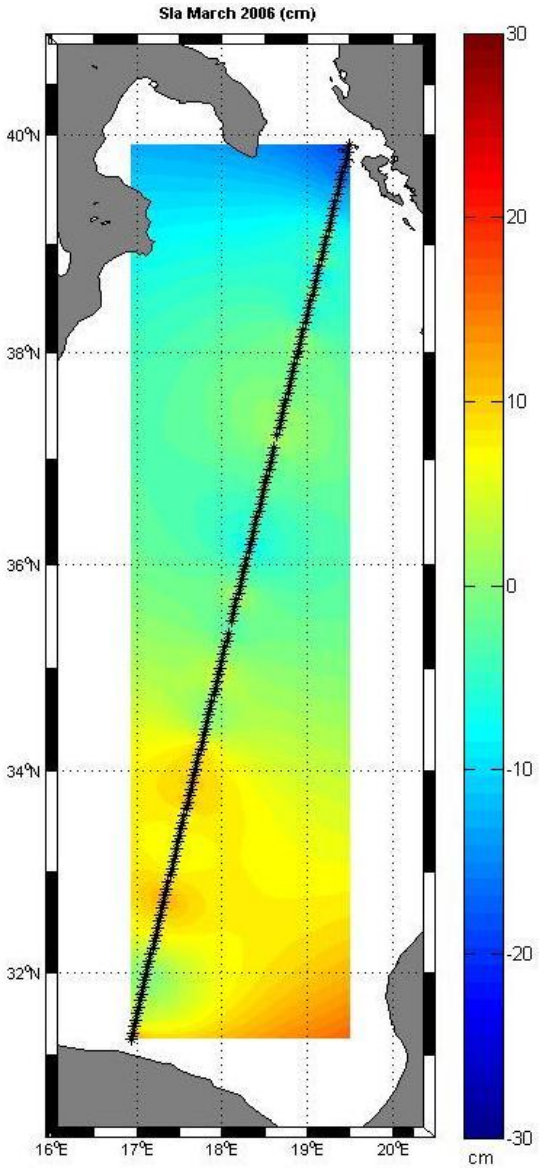
Τιμές SLA για το 2006



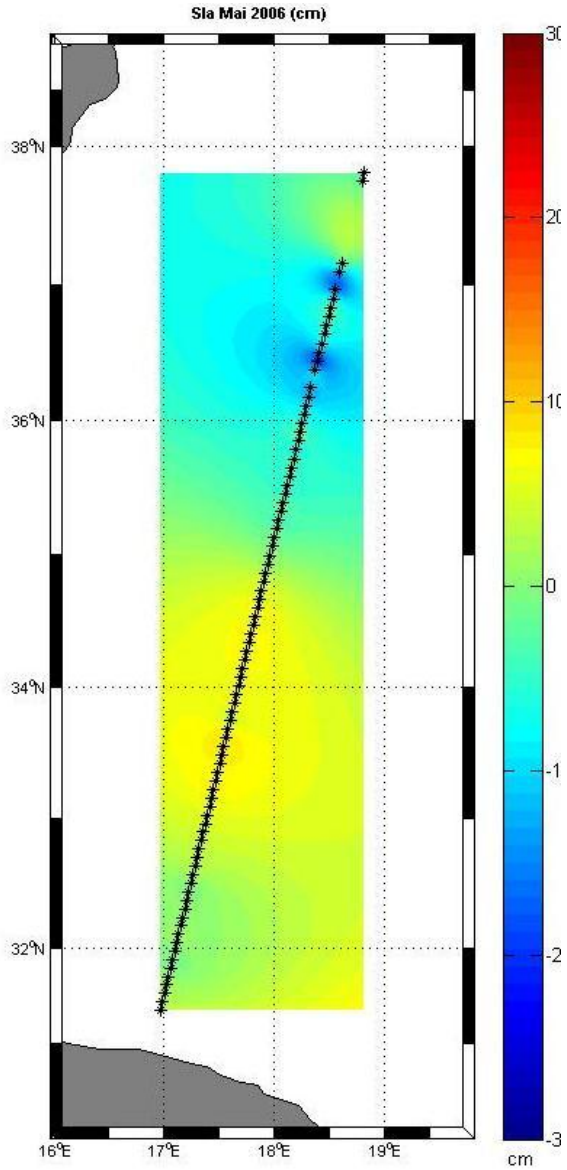
Σχήμα 4.11: Τιμές SLA (cm) τον Ιανουάριο 2006



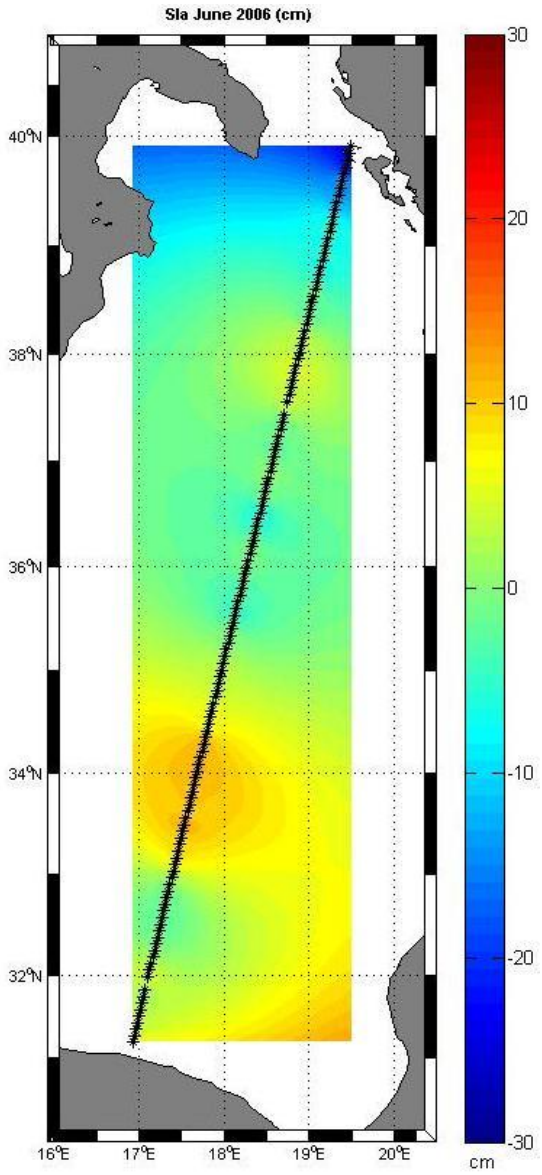
Σχήμα 4.12: Τιμές SLA (cm) το Φεβρουάριο 2006



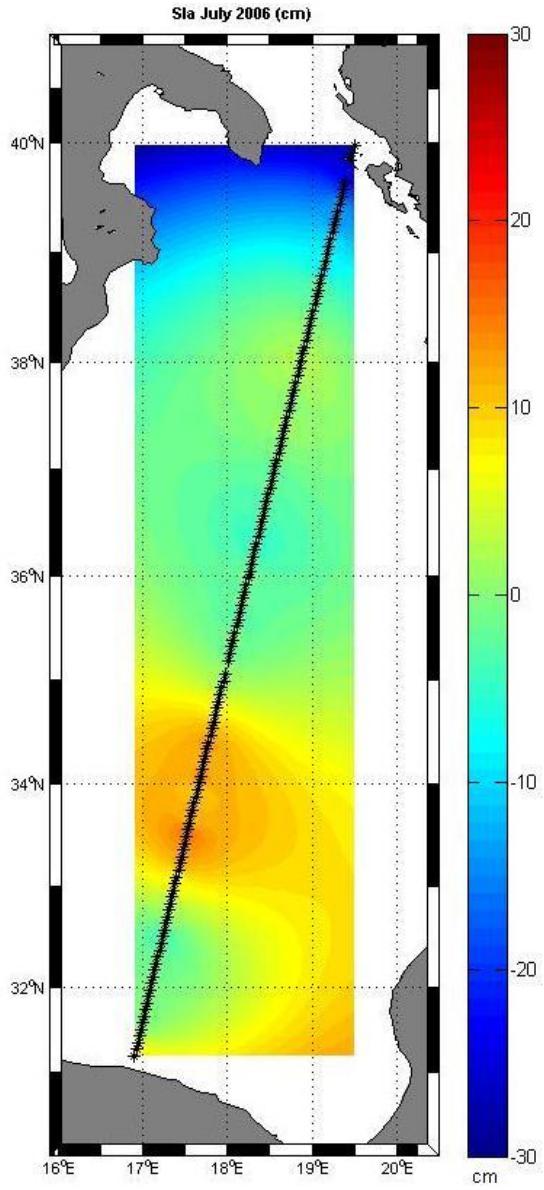
Σχήμα 4.13: Τιμές SLA (cm) το Μάρτιο 2006



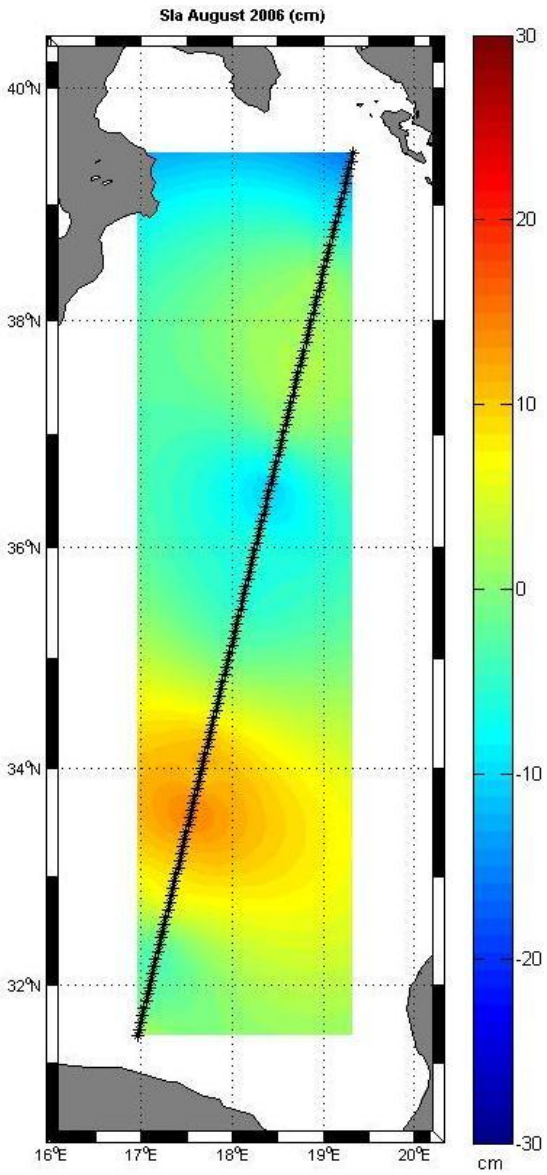
Σχήμα 4.14: Τιμές SLA (cm) το Μάιο 2006



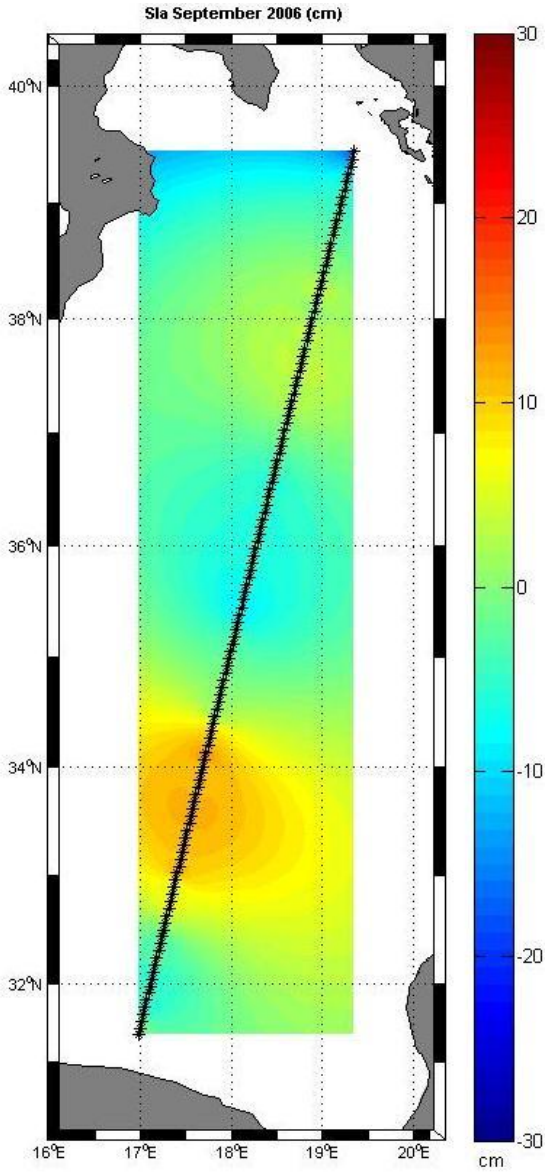
Σχήμα 4.15: Τιμές SLA (cm) τον Ιούνιο 2006



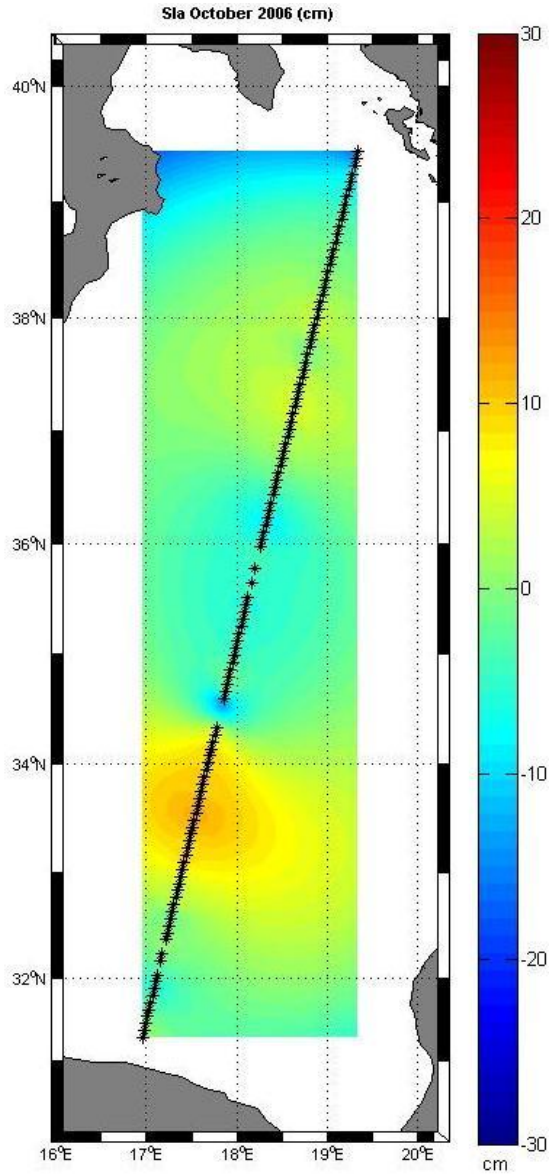
Σχήμα 4.16: Τιμές SLA (cm) τον Ιούλιο 2006



Σχήμα 4.17: Τιμές SLA (cm) τον Αύγουστο 2006



Σχήμα 4.18: Τιμές SLA (cm) το Σεπτέμβριο 2006



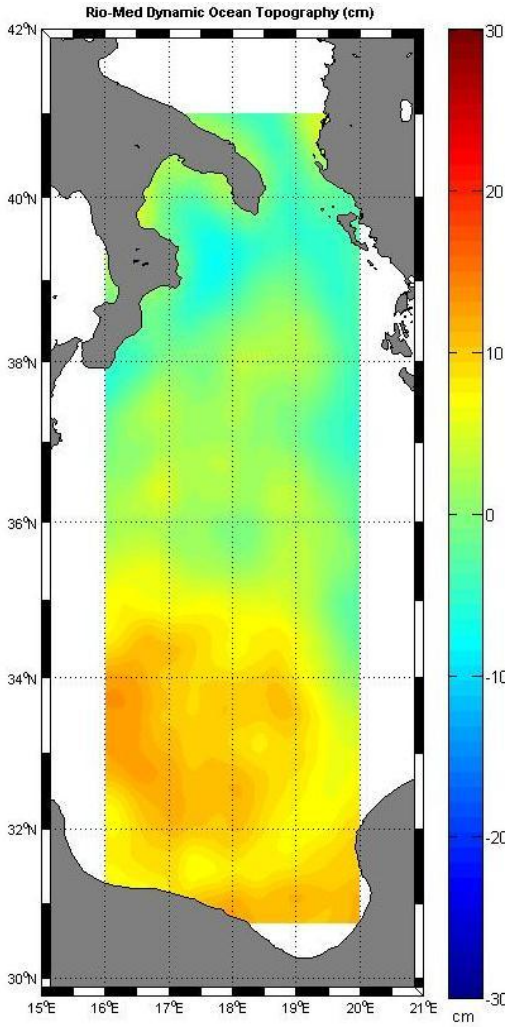
Σχήμα 4.19: Τιμές SLA (cm) τον Οκτώβριο 2006

Πίνακας 4.2: Στατιστικά τιμών SLA (cm) για το έτος 2006

min	max	mean	std
-32.4	26.5	0.75	±11.83

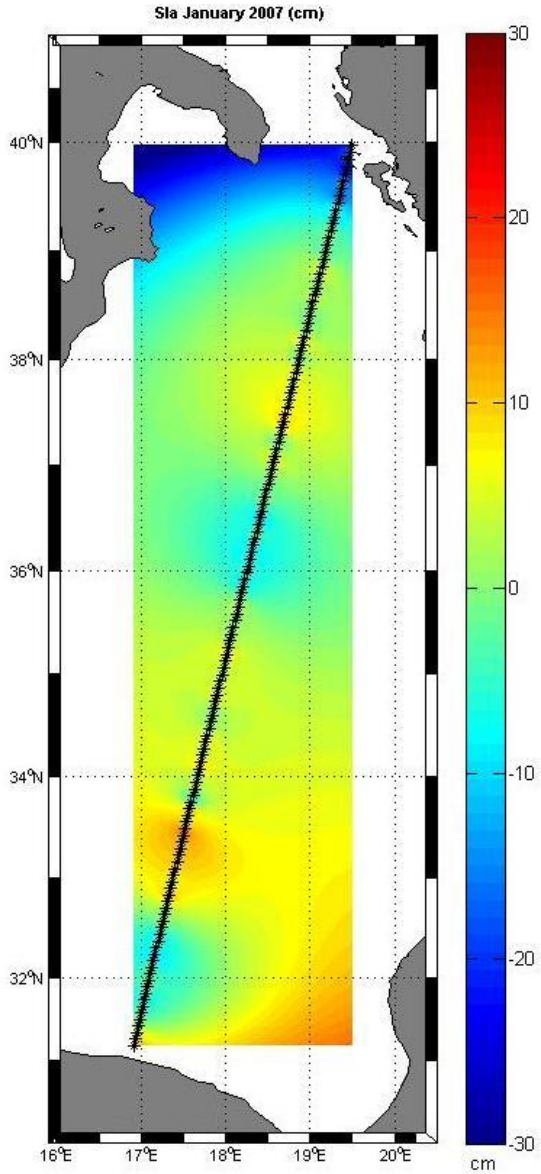
Σε σχέση με το προηγούμενο έτος, τα σχήματα για το έτος 2006 παρουσιάζουν πιο ομαλές μεταβολές. Αν και οι ακραίες τιμές για το 2006 είναι μεγαλύτερες σε απόλυτη τιμή από τις αντίστοιχες για το 2005, βλέπουμε σε όλα τα σχήματα πως η πλειοψηφία της περιοχής παρουσιάζει τιμές κοντά στο μηδέν. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ένα τοπικό μέγιστο που παρατηρείται σε όλα τα σχήματα των καλοκαιρινών και φθινοπωρινών μηνών στην περιοχή με φ≈33.8° και λ≈17.5°. Η τιμή αυτή εμφανίζεται και στην απεικόνιση των τιμών της δυναμίκης θαλάσσιας τοπογραφίας (DOT) του μοντέλου της Rio που

παρουσιάζεται παρακάτω (Σχήμα 4.20). Επομένως, πρόκειται για ένα φαινόμενο το οποίο οφείλεται σε κάποια τοπικά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής και η επίδρασή της αποτυπώνεται σε όλα τα μεγέθη που σχετίζονται με την θαλάσσια τοπογραφία. Ειδικότερα, στα Σχήματα 4.15-4.19, εμφανίζεται στην παραπάνω περιοχή τιμή της SLA > 10 cm ενώ στο υπόλοιπο του Σχήματος οι τιμές είναι κοντά στο μηδέν ή έχουν μικρές αρνητικές τιμές >-10 cm. Στο μοντέλο της Rio η τιμή αυτή έχει το ίδιο μέγεθος αλλά καταλαμβάνει μεγαλύτερη έκταση στον χάρτη.

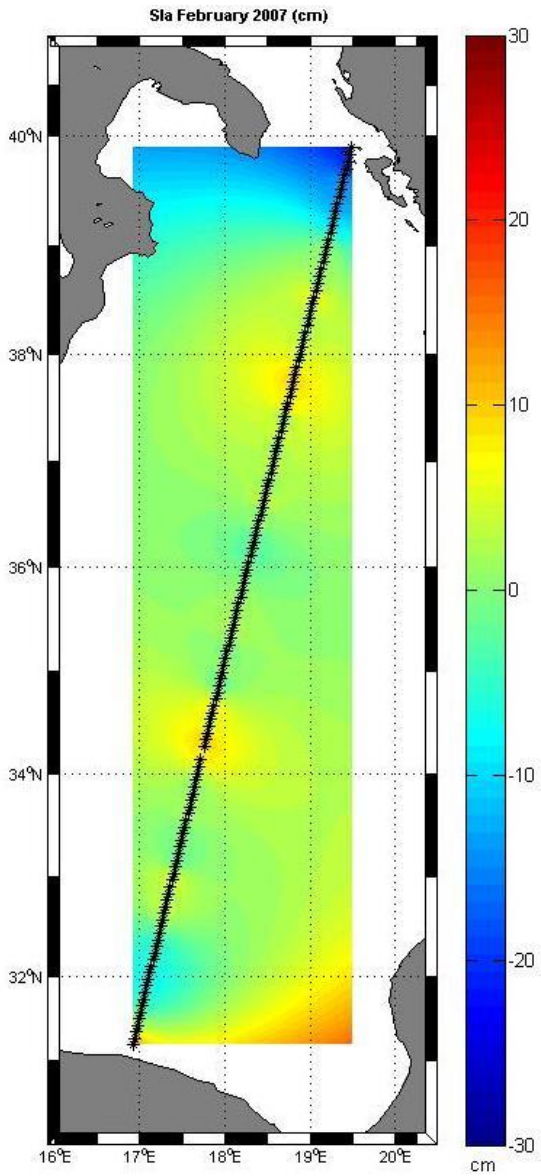


Σχήμα 4.20: Τιμές DOT (cm) για το μοντέλο της Rio

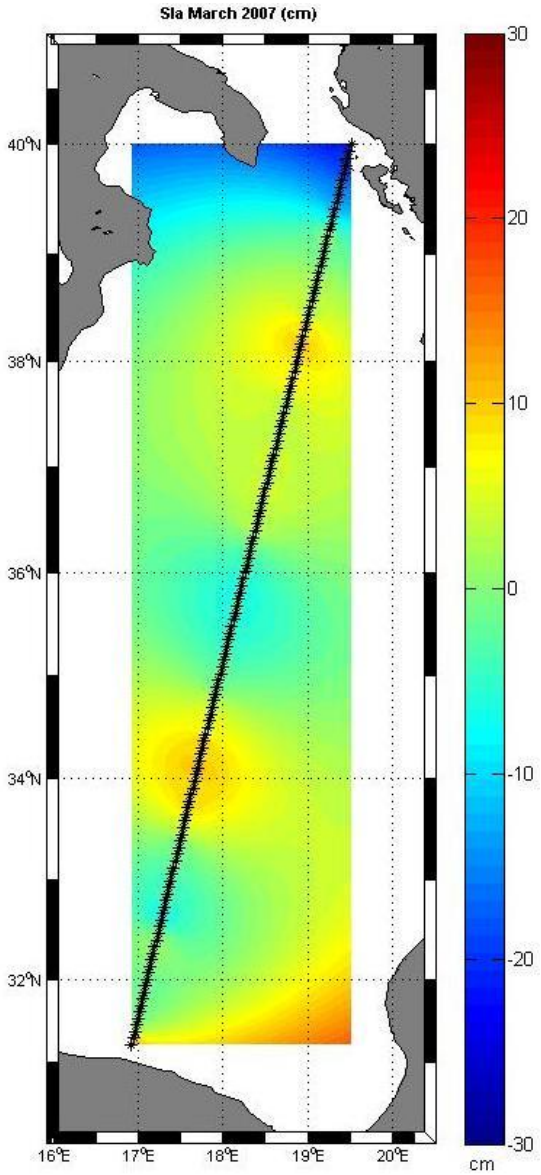
Τιμές SLA για το 2007



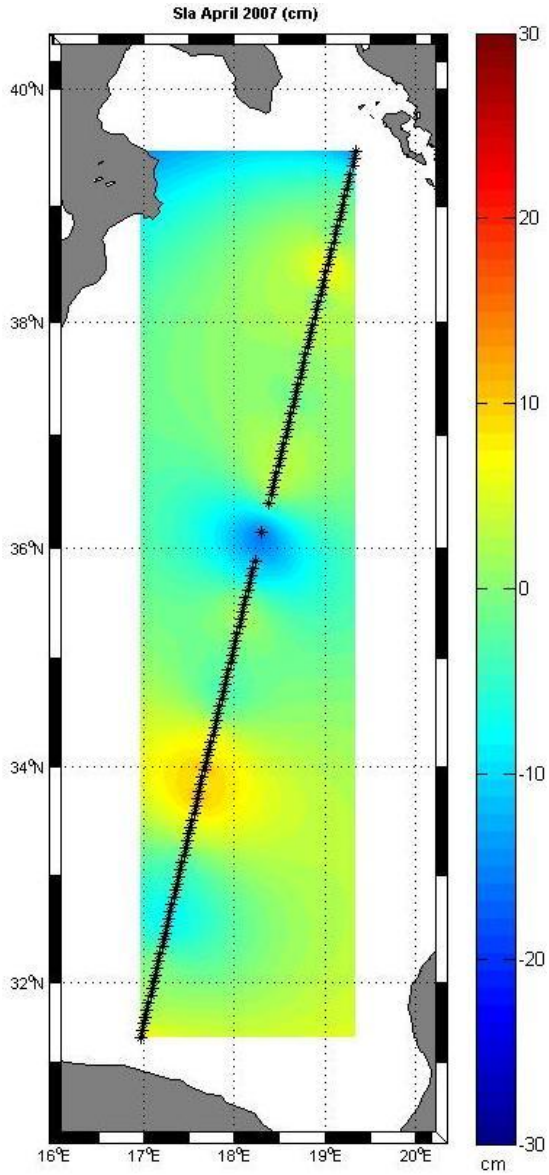
Σχήμα 4.21: Τιμές SLA (cm) τον Ιανουάριο 2007



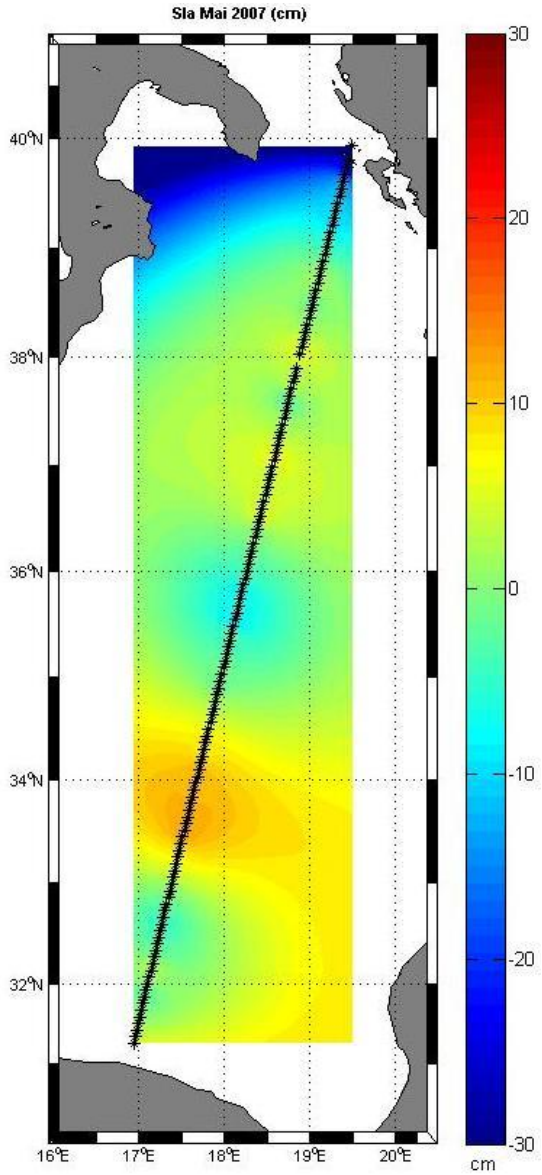
Σχήμα 4.22: Τιμές SLA (cm) το Φεβρουάριο 2007



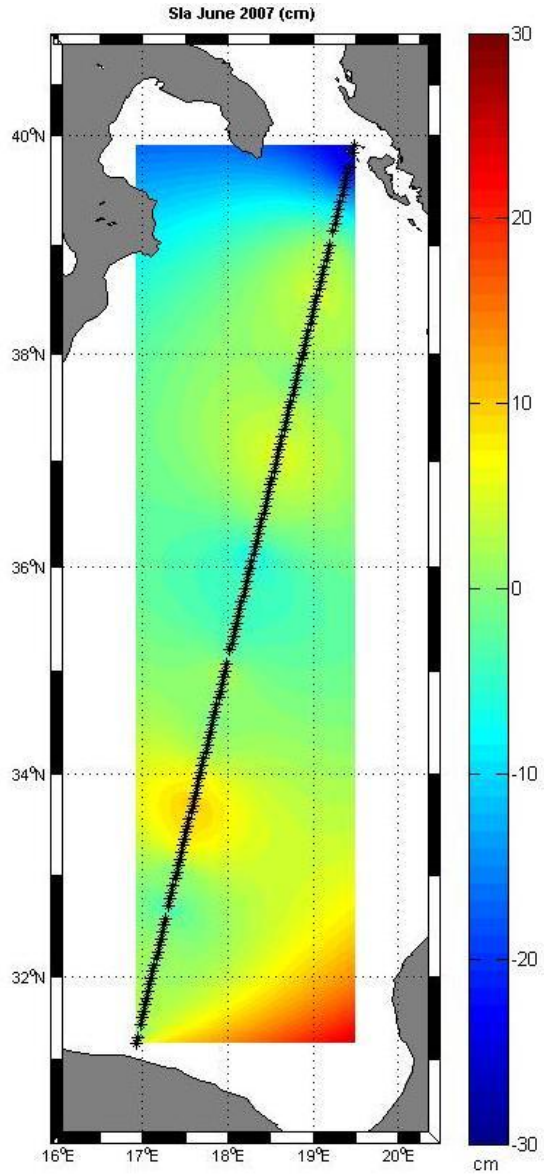
Σχήμα 4.23: Τιμές SLA (cm) το Μάρτιο 2007



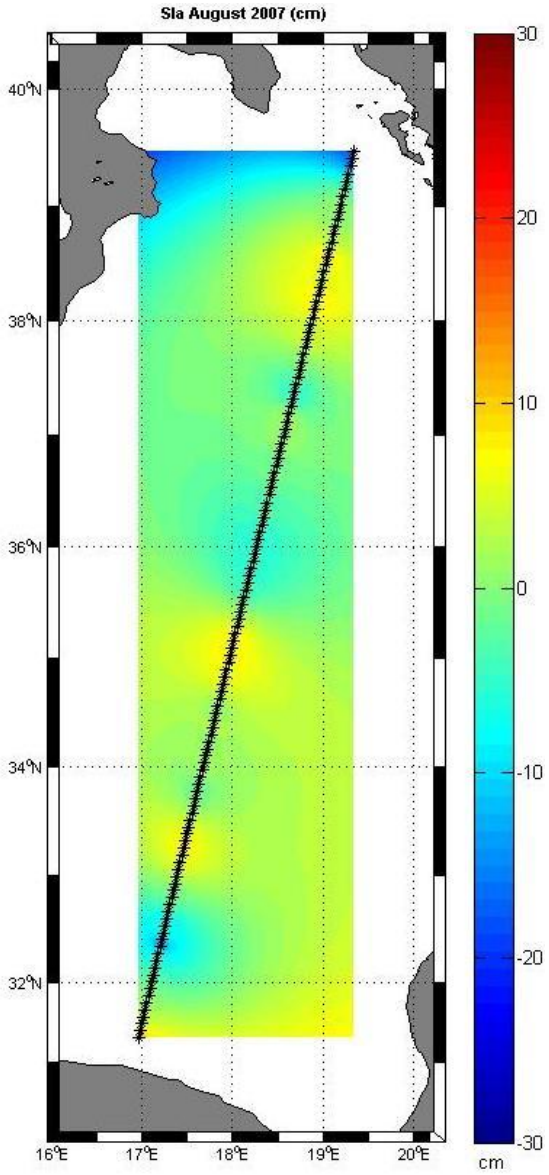
Σχήμα 4.24: Τιμές SLA (cm) τον Απρίλιο 2007



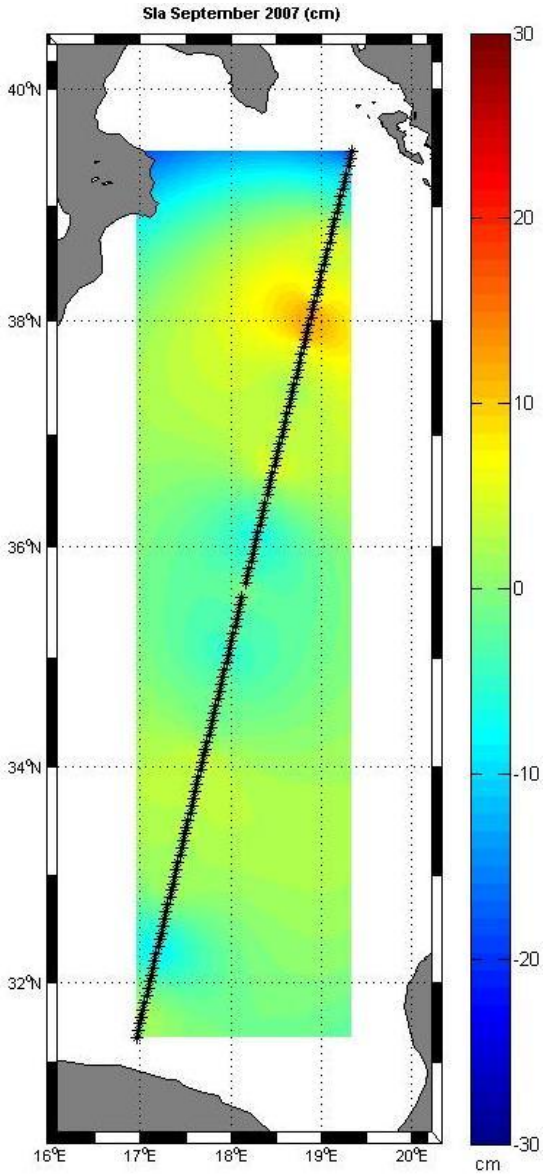
Σχήμα 4.25: Τιμές SLA (cm) το Μάιο 2007



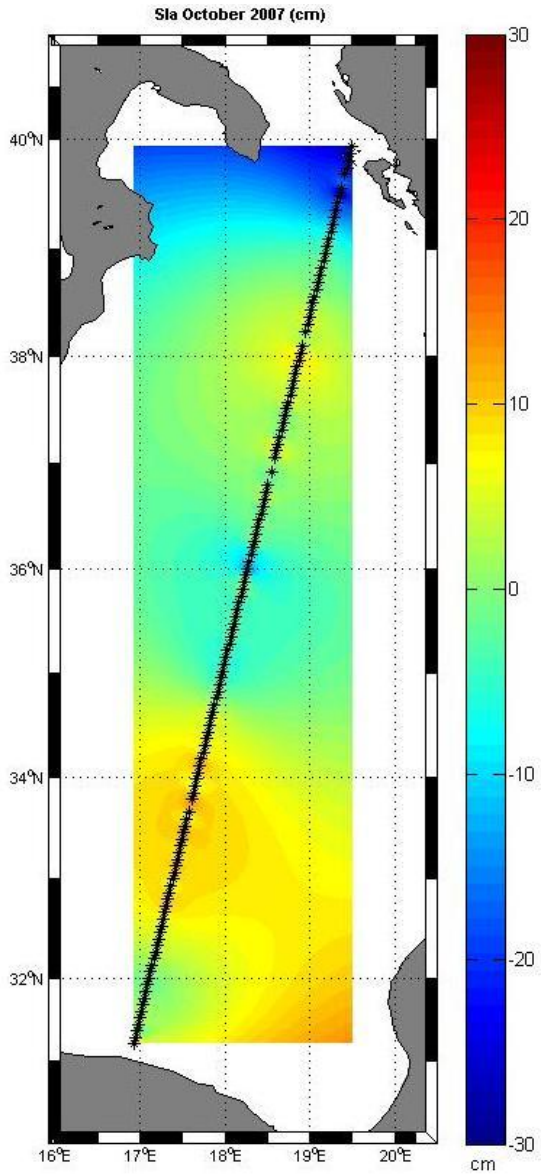
Σχήμα 4.26: Τιμές SLA (cm) τον Ιούνιο 2007



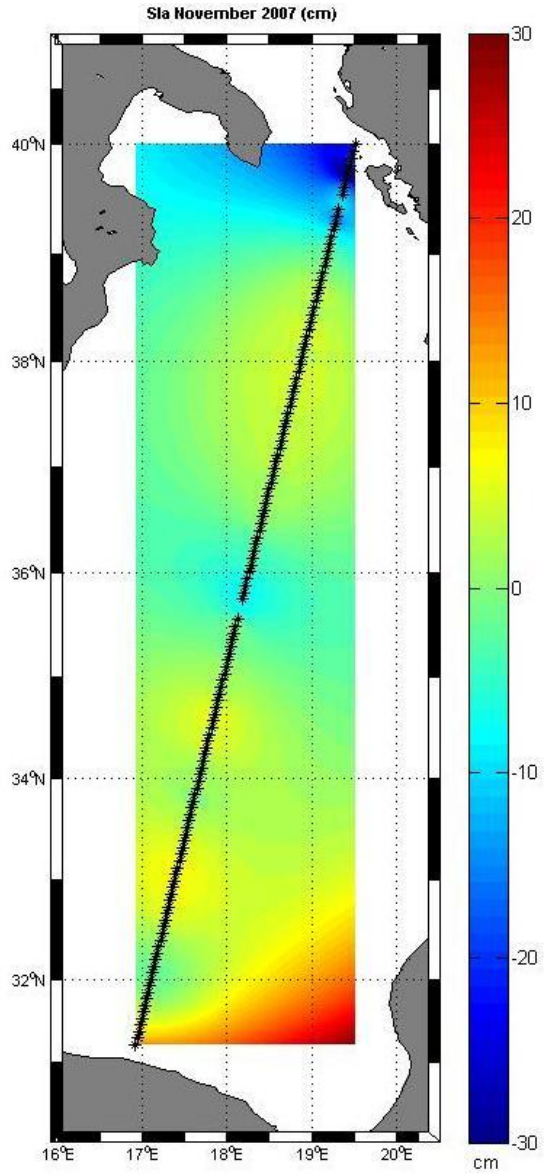
Σχήμα 4.27: Τιμές SLA (cm) τον Αύγουστο 2007



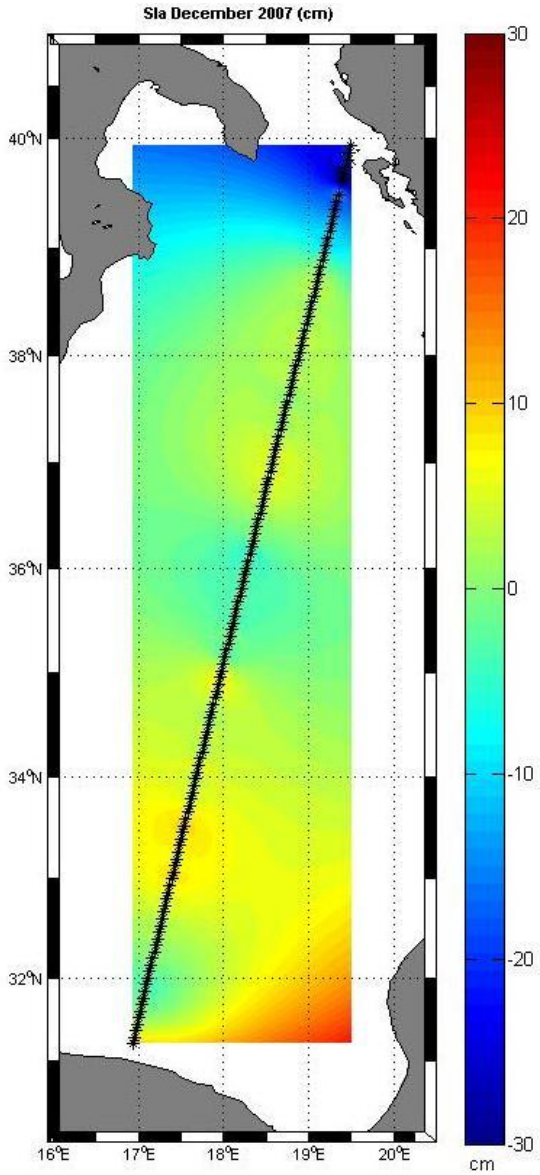
Σχήμα 4.28: Τιμές SLA (cm) το Σεπτέμβριο 2007



Σχήμα 4.29: Τιμές SLA (cm) τον Οκτώβριο 2007



Σχήμα 4.30: Τιμές SLA (cm) το Νοέμβριο 2007



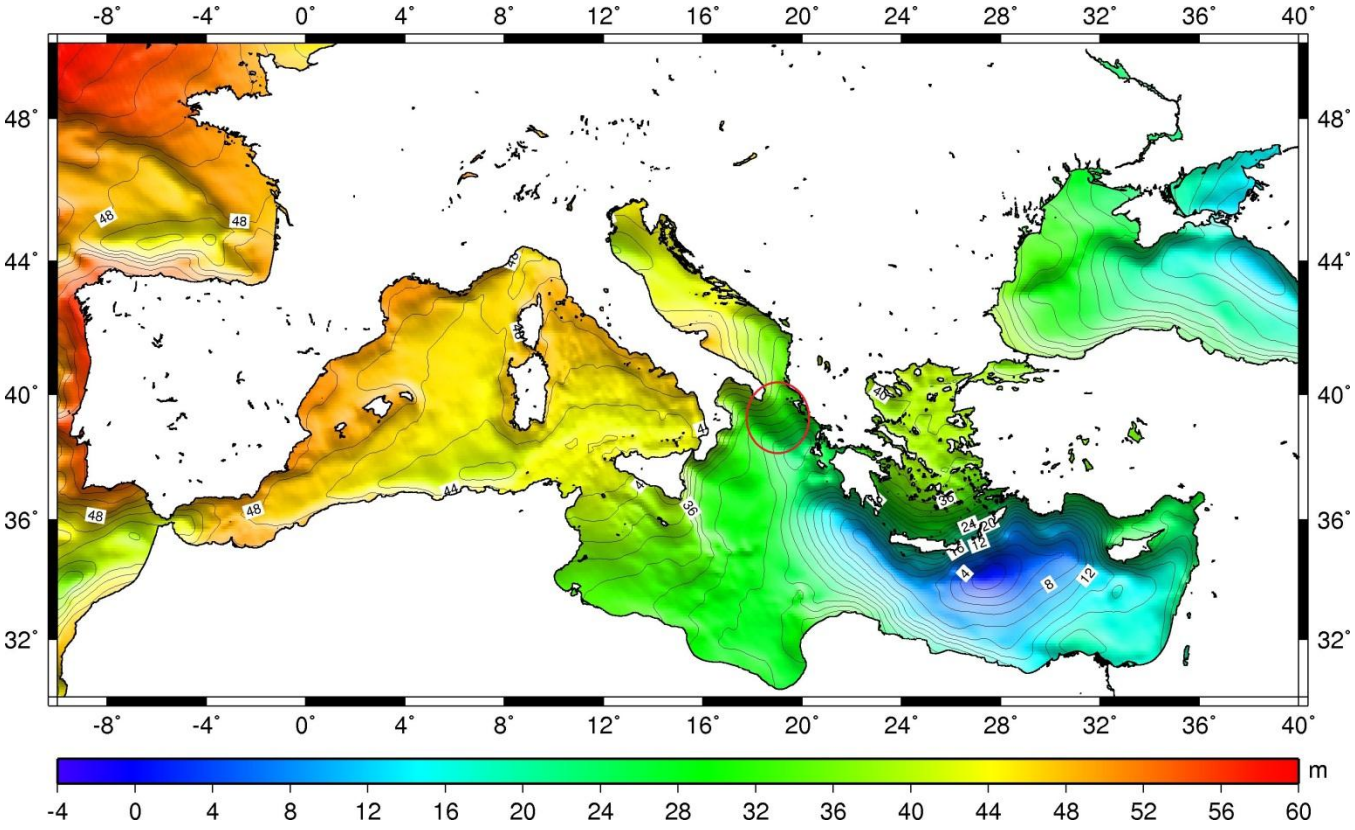
Σχήμα 4.31: Τιμές SLA (cm) το Δεκέμβριο 2007

Πίνακας 4.3: Στατιστικά τιμών SLA (cm) για το έτος 2007

min	max	mean	std
-43.6	26.2	1.38	±11.38

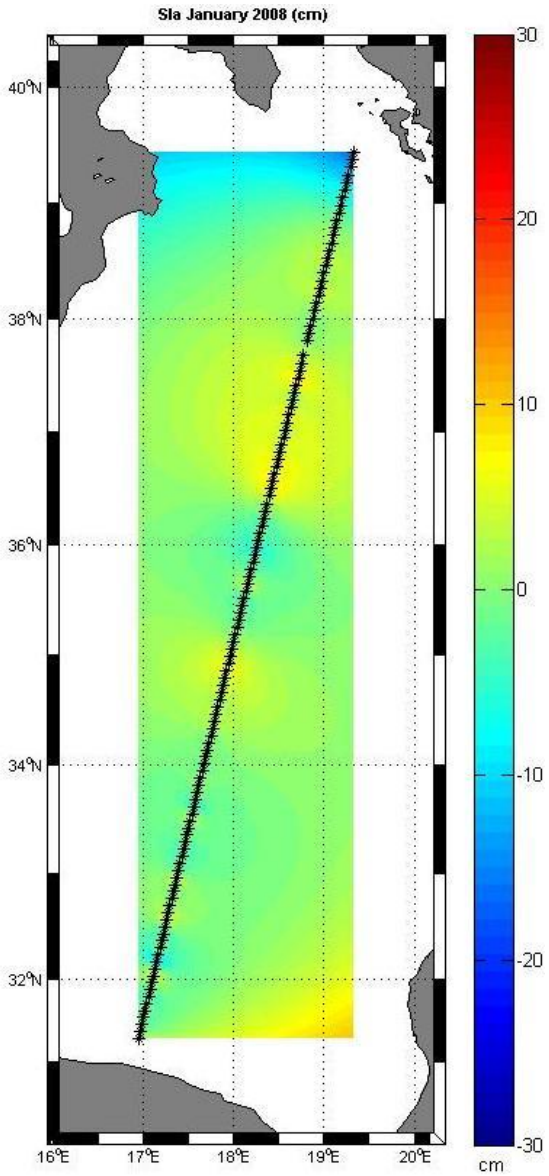
Το 2007, παρουσιάζεται η πιο χαμηλή τιμή της SLA (-43.6 cm) σε σχέση με τα προηγούμενα έτη όπου δεν παρατηρήθηκε τιμή μικρότερη των -35 cm. Η παραπάνω τιμή εμφανίζεται κοντά στο νησί της Κέρκυρας (φ=39.93°, λ=19.50°). Γενικότερα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός πως στα Σχήματα 4.20, 4.21, 4.22, 4.24, 4.28, 4.29 & 4.30 όπου το ίχνος της διάβασης πλησιάζει το νησί της Κέρκυρας, παρουσιάζονται πολύ χαμηλές τιμές. Όπως φαίνεται και στον χάρτη των υψομέτρων της ΜΣΘ του μοντέλου που πρόκυψε από δεδομένα των δορυφόρων Envisat & Jason σε συνδυασμό με το

γεωδυναμικό μοντέλο EGM 2008 (Νατσιόπουλος 2010, Σχήμα 4.32) στον ευρύτερο χώρο του Ιονίου πελάγους παρατηρείται μια τοπική ανωμαλία στις τιμές. Πιθανότατα, οι χαμηλές τιμές να οφείλονται στην ανωμαλία αυτή. Όμως, πρέπει να τονίσουμε πως οι τιμές του αλτίμετρου παρουσιάζουν μεγάλη πιθανότητα σφάλματος κοντά στην ξηρά και ίσως οι τιμές αυτές να είναι αποτέλεσμα χονδροειδούς σφάλματος. Επιπρόσθετα, σε όλα τα σχήματα διακρίνονται μεγαλύτερες διακυμάνσεις με αρκετά τοπικά μέγιστα και ελάχιστα κατά μήκους της διάβασης.

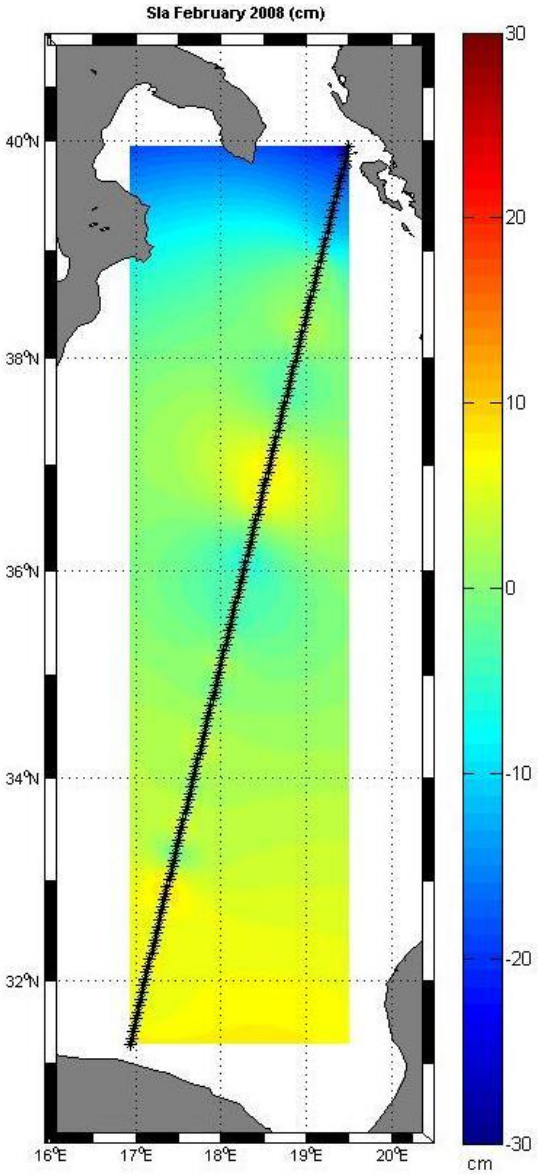


Σχήμα 4.32: Τιμές του υψομέτρου της ΜΣΘ από τα δεδομένα των αποστολών Jason-1 & Envisat

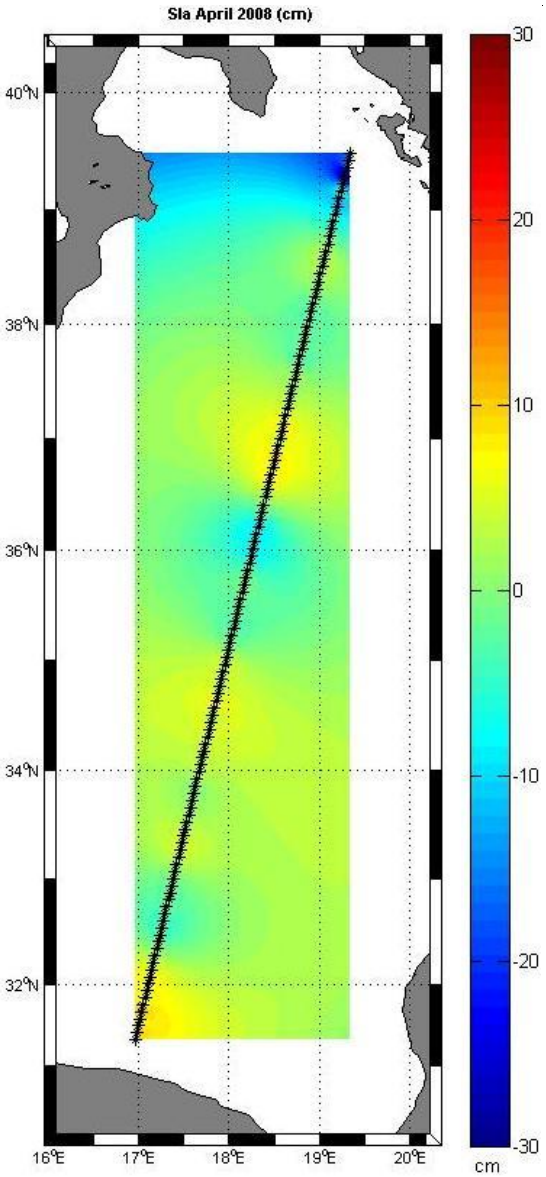
Τιμές SLA για το 2008



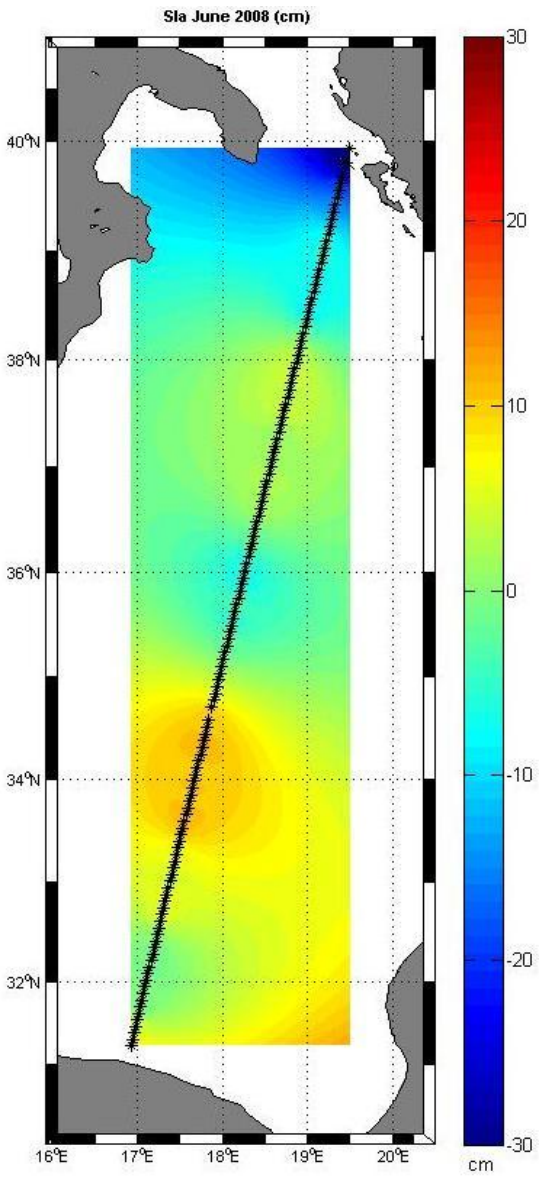
Σχήμα 4.33: Τιμές SLA (cm) τον Ιανουάριο 2008



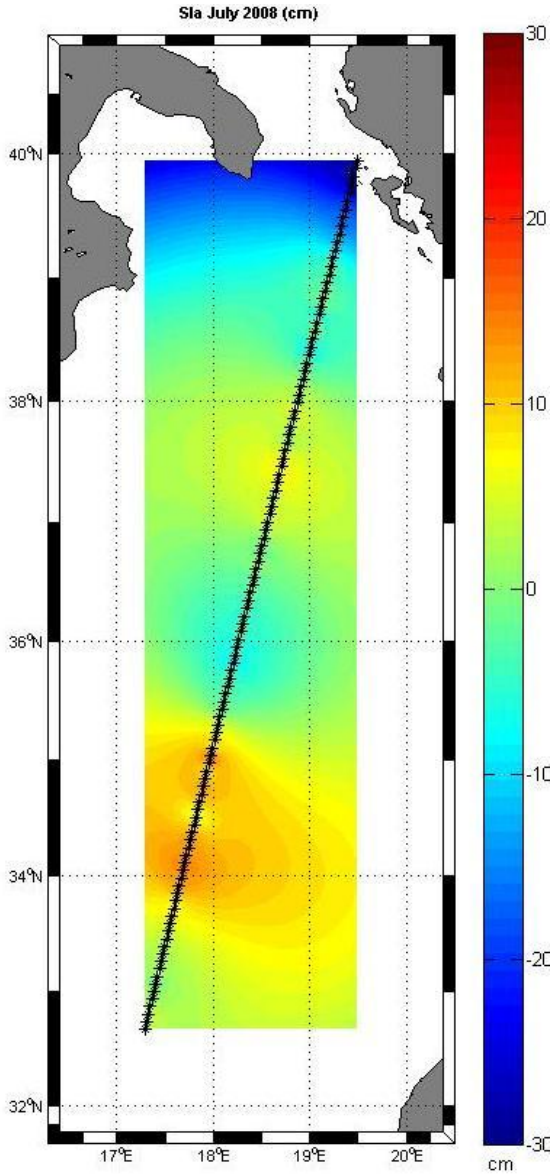
Σχήμα 4.34: Τιμές SLA (cm) το Φεβρουάριο 2008



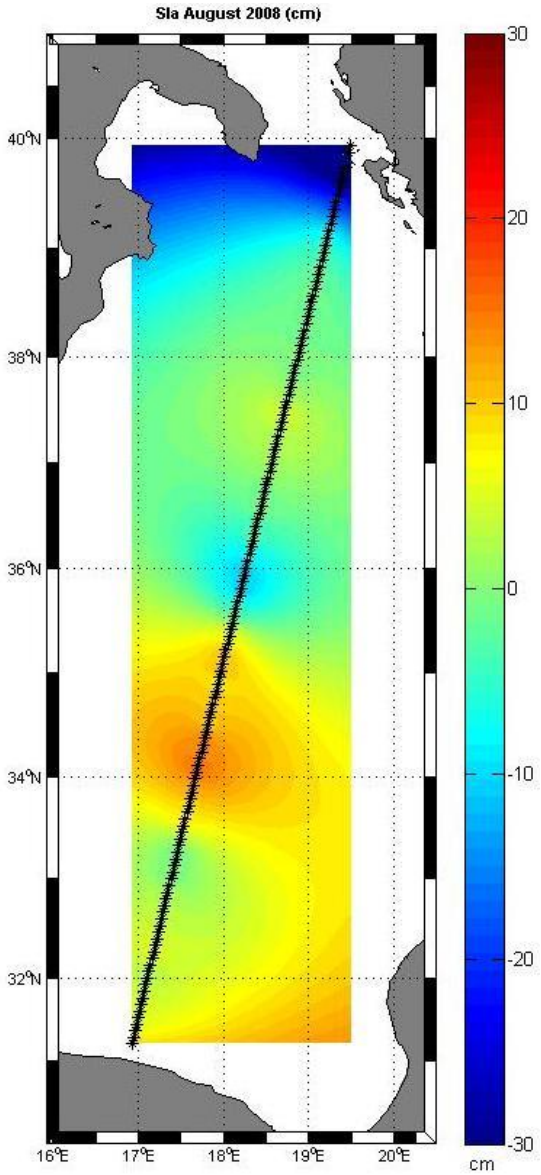
Σχήμα 4.35: Τιμές SLA (cm) τον Απρίλιο 2008



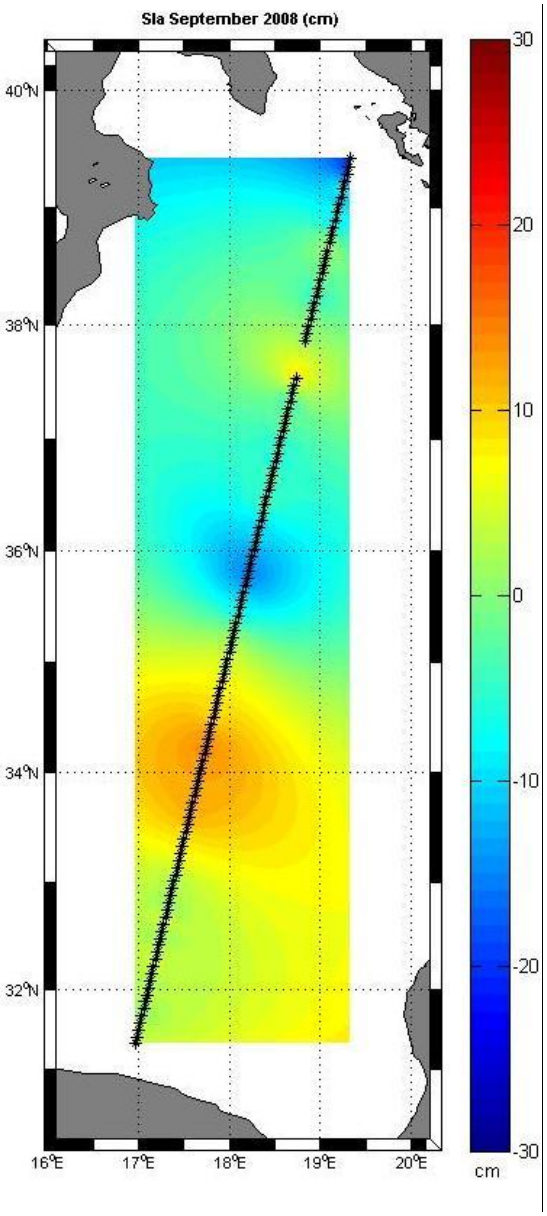
Σχήμα 4.36: Τιμές SLA (cm) τον Ιούνιο 2008



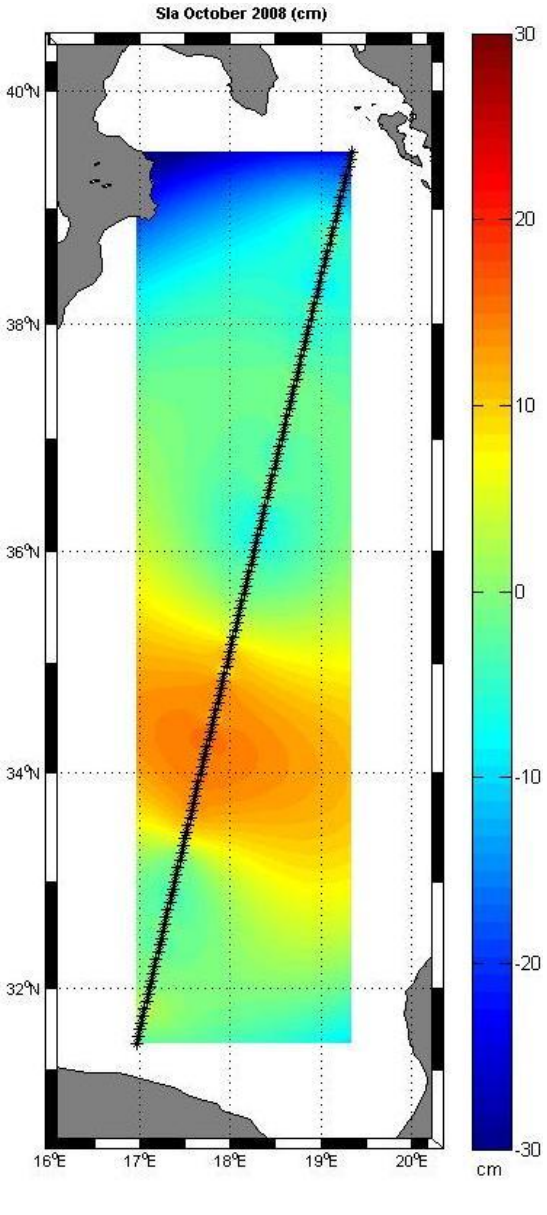
Σχήμα 4.37: Τιμές SLA (cm) τον Ιούλιο 2008



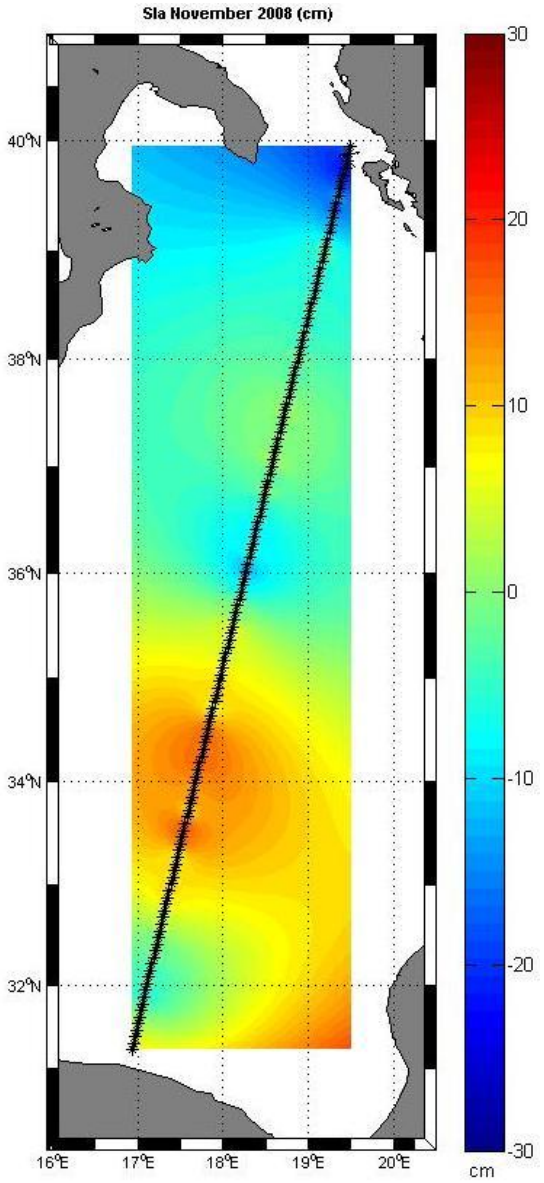
Σχήμα 4.38: Τιμές SLA (cm) τον Αύγουστο 2008



Σχήμα 4.39: Τιμές SLA (cm) το Σεπτέμβριο 2008



Σχήμα 4.40: Τιμές SLA (cm) τον Οκτώβριο 2008



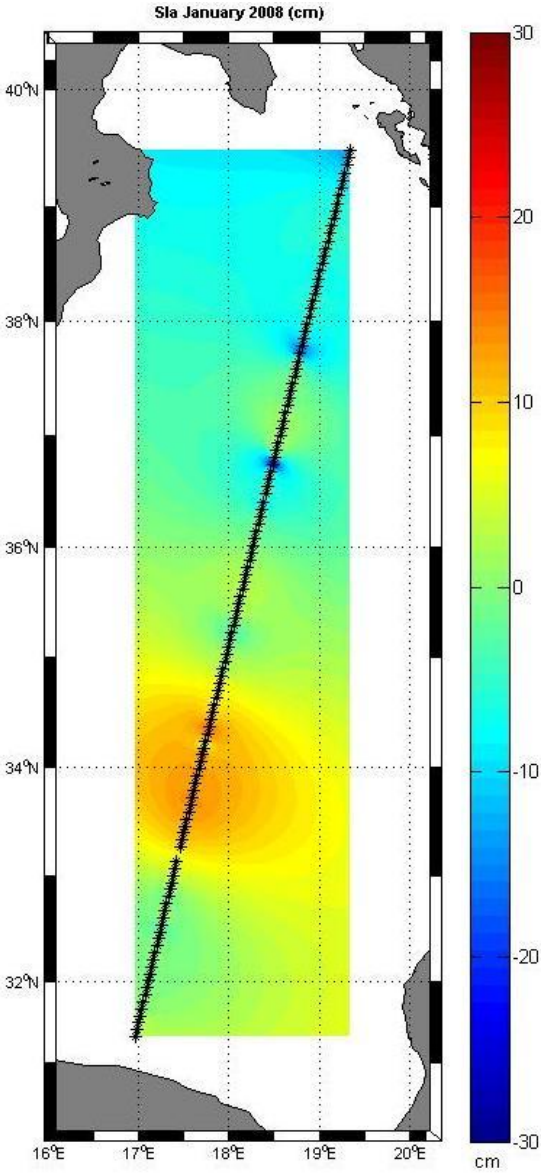
Σχήμα 4.41: Τιμές SLA (cm) το Νοέμβριο 2008

Πίνακας 4.4: Στατιστικά τιμών SLA (cm) για το έτος 2008

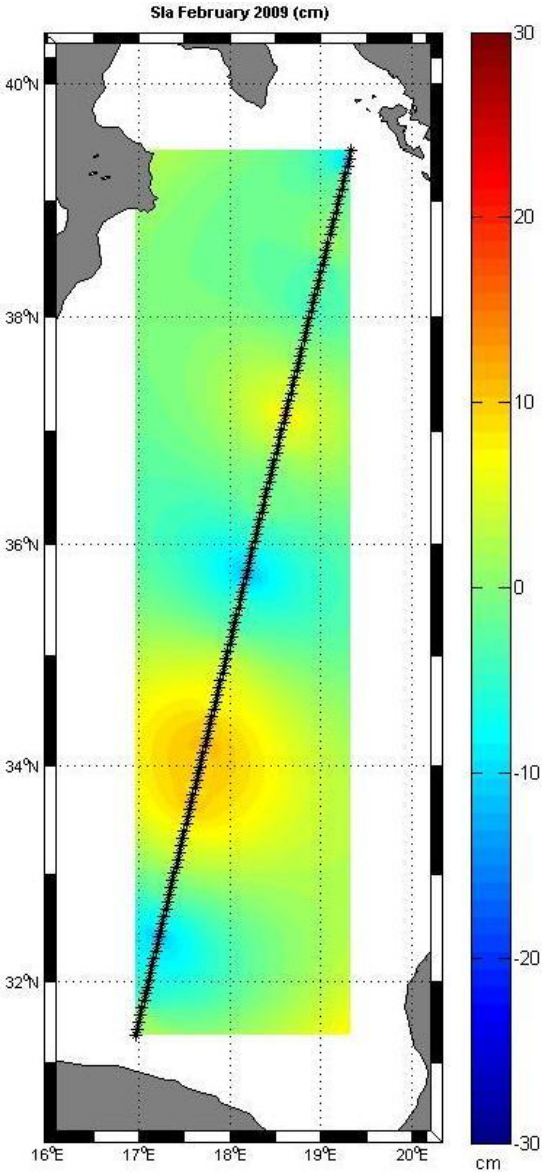
min	max	mean	std
-41.3	33.1	2.11	±13.29

Το 2008, εμφανίζει αρκετές ομοιότητες με τις απεικονίσεις των προηγούμενων ετών. Εμφανίζονται και εδώ αρκετά τοπικά ελάχιστα και μέγιστα ενώ και οι περιοχές που έχουμε αναφέρει παραπάνω παρουσιάζουν τα ίδια χαρακτηριστικά. Είναι και σε αυτή τη χρονιά εμφανείς οι δύο ζώνες τιμών στις οποίες μπορεί να χωριστεί η περιοχή μελέτης.

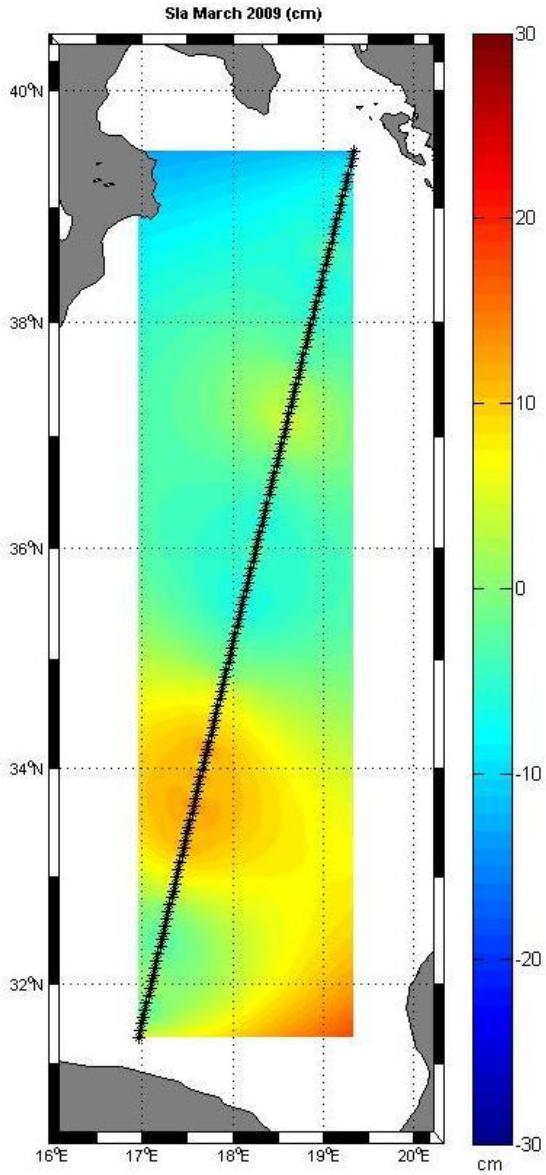
Τιμές SLA για το 2009



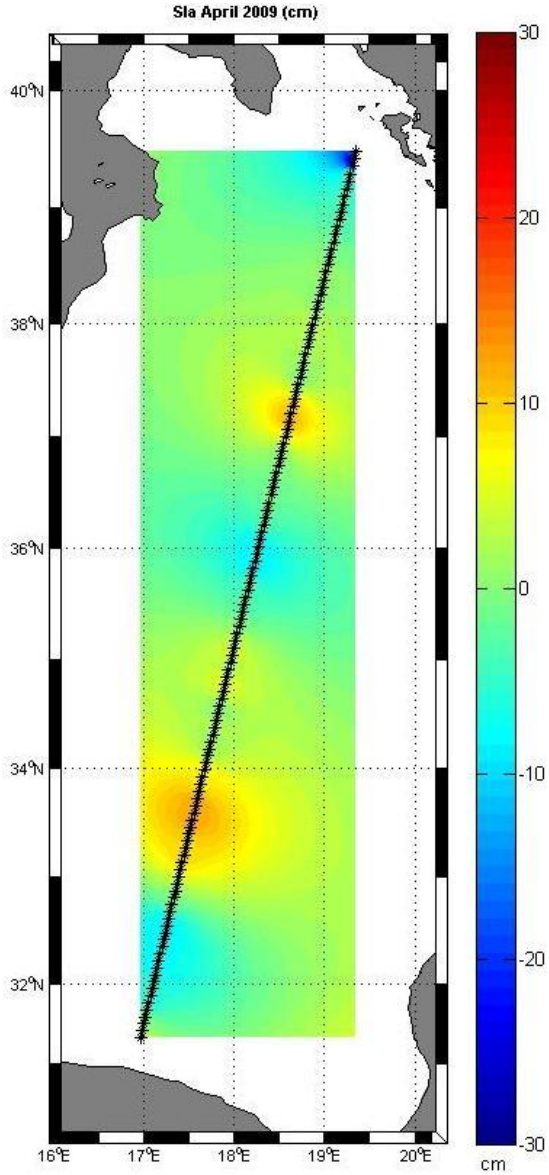
Σχήμα 4.42: Τιμές SLA (cm) τον Ιανουάριο 2009



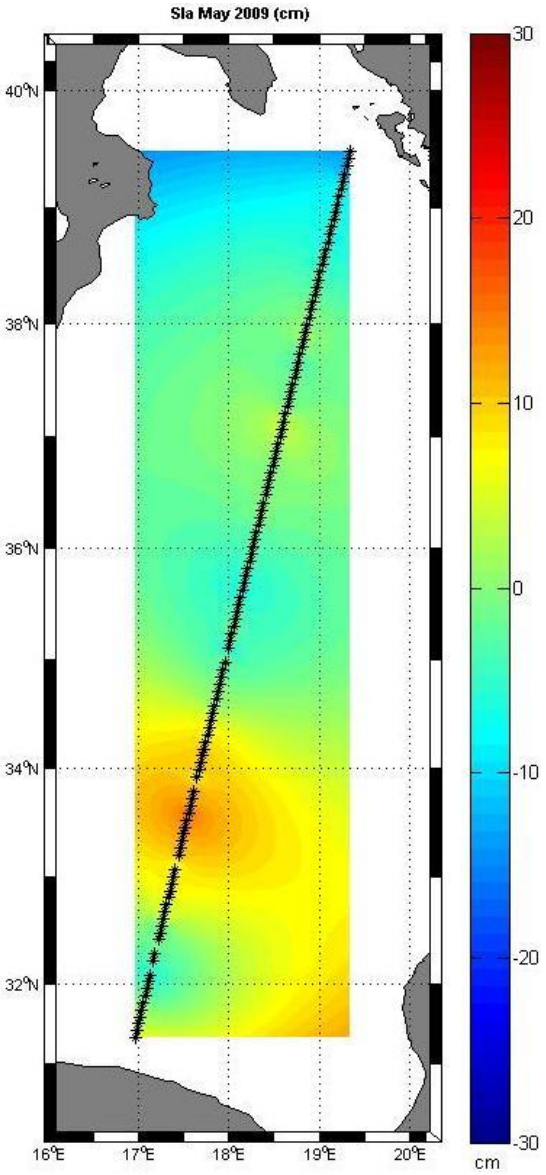
Σχήμα 4.43: Τιμές SLA (cm) το Φεβρουάριο 2009



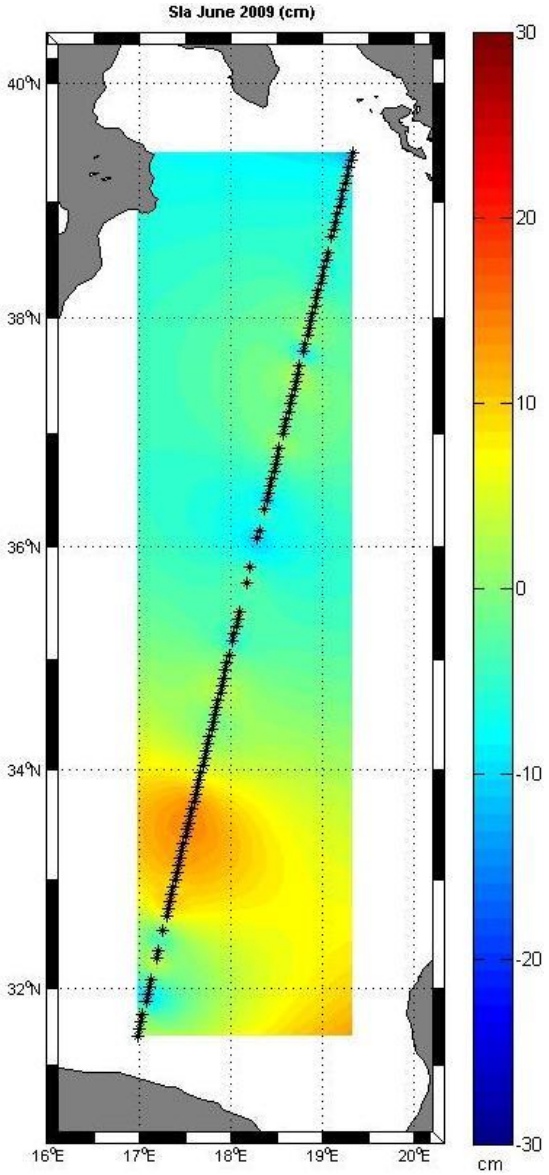
Σχήμα 4.44: Τιμές SLA (cm) το Μάρτιο 2009



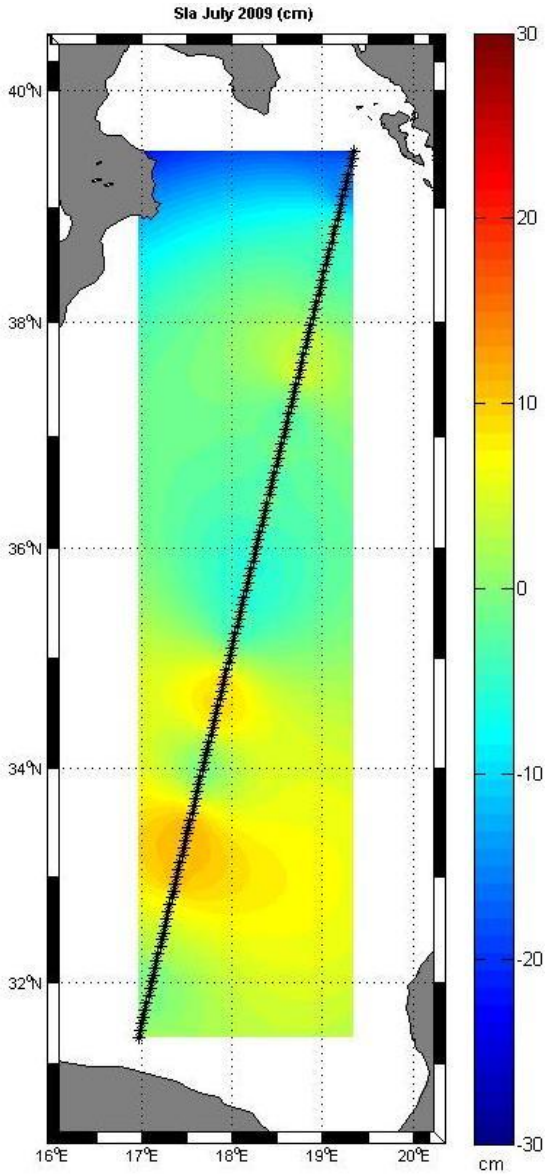
Σχήμα 4.45: Τιμές SLA (cm) τον Απρίλιο 2009



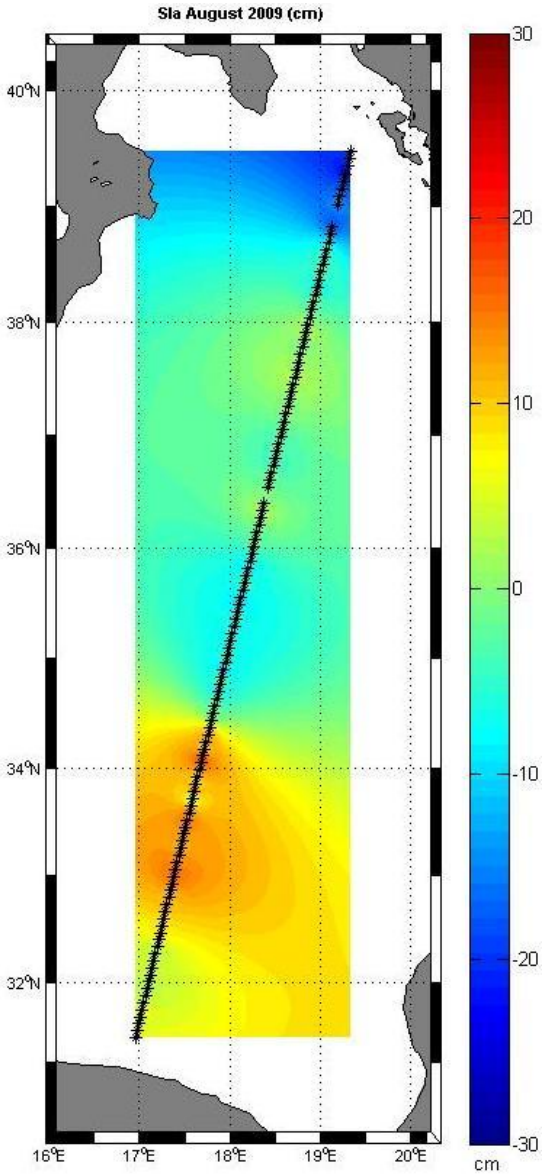
Σχήμα 4.46: Τιμές SLA (cm) το Μάιο 2009



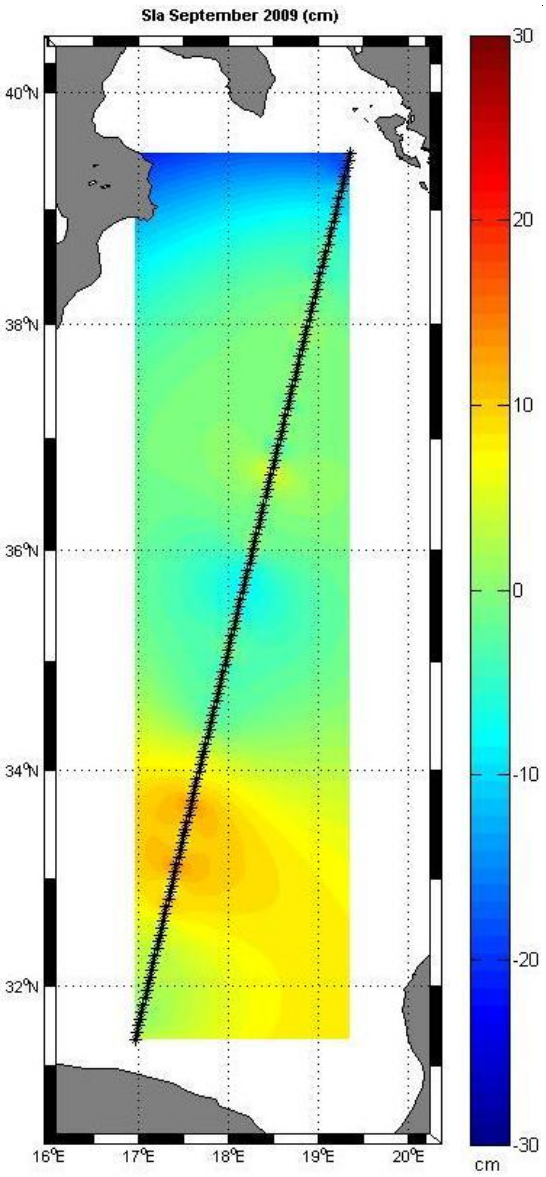
Σχήμα 4.47: Τιμές SLA (cm) τον Ιούνιο 2009



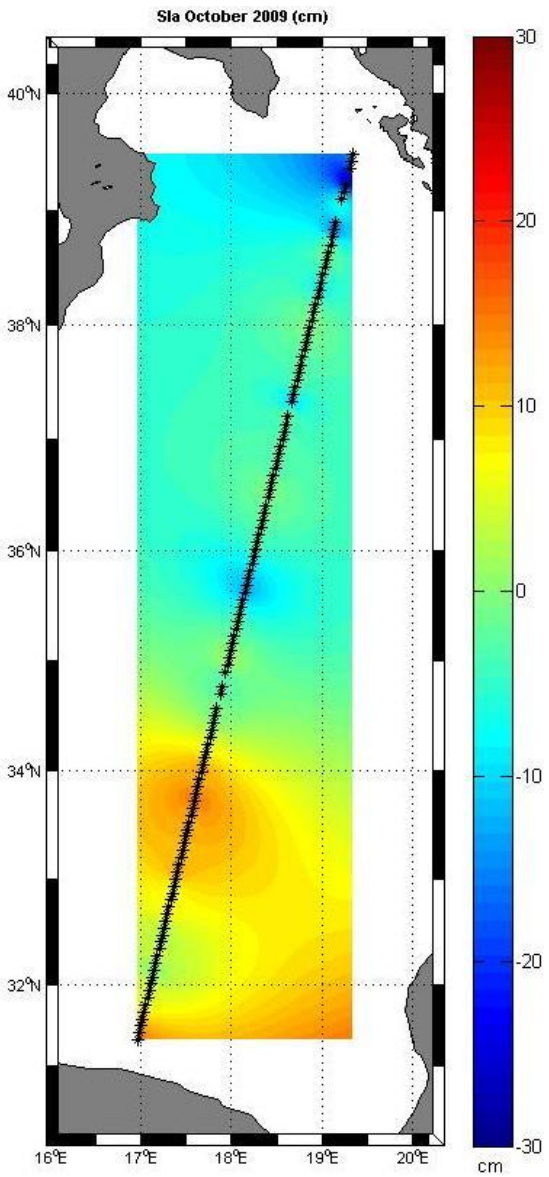
Σχήμα 4.48: Τιμές SLA (cm) τον Ιούλιο 2009



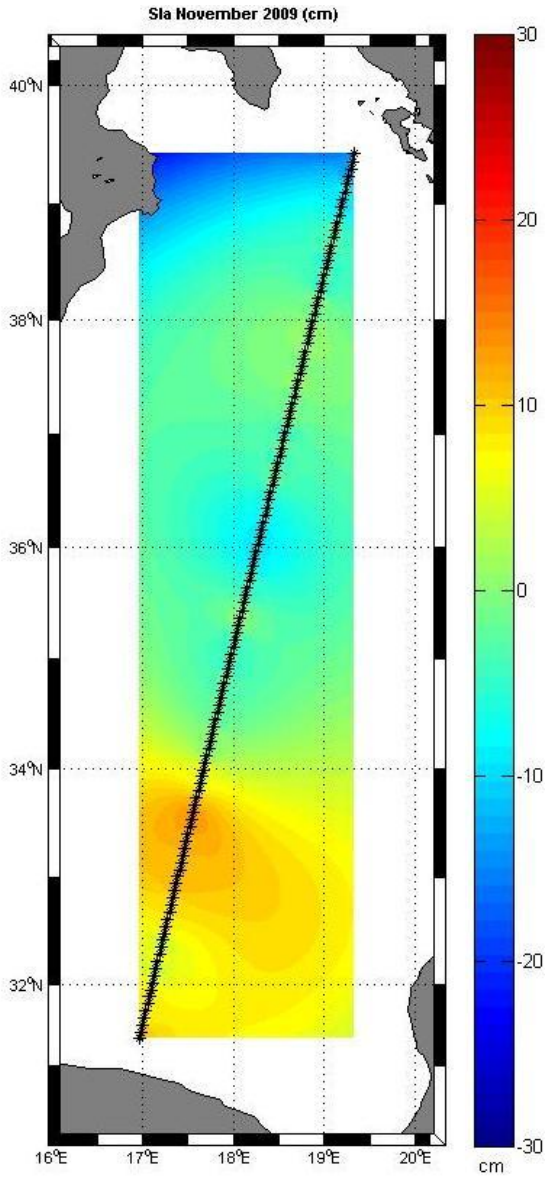
Σχήμα 4.49: Τιμές SLA (cm) τον Αύγουστο 2009



Σχήμα 4.50: Τιμές SLA (cm) το Σεπτέμβριο 2009



Σχήμα 4.51: Τιμές SLA (cm) τον Οκτώβριο 2009



Σχήμα 4.52: Τιμές SLA (cm) το Νοέμβριο 2009

Πίνακας 4.5: Στατιστικά τιμών SLA (cm) για το έτος 2009

min	max	mean	std
-33.7	29.6	2.248	±11.534

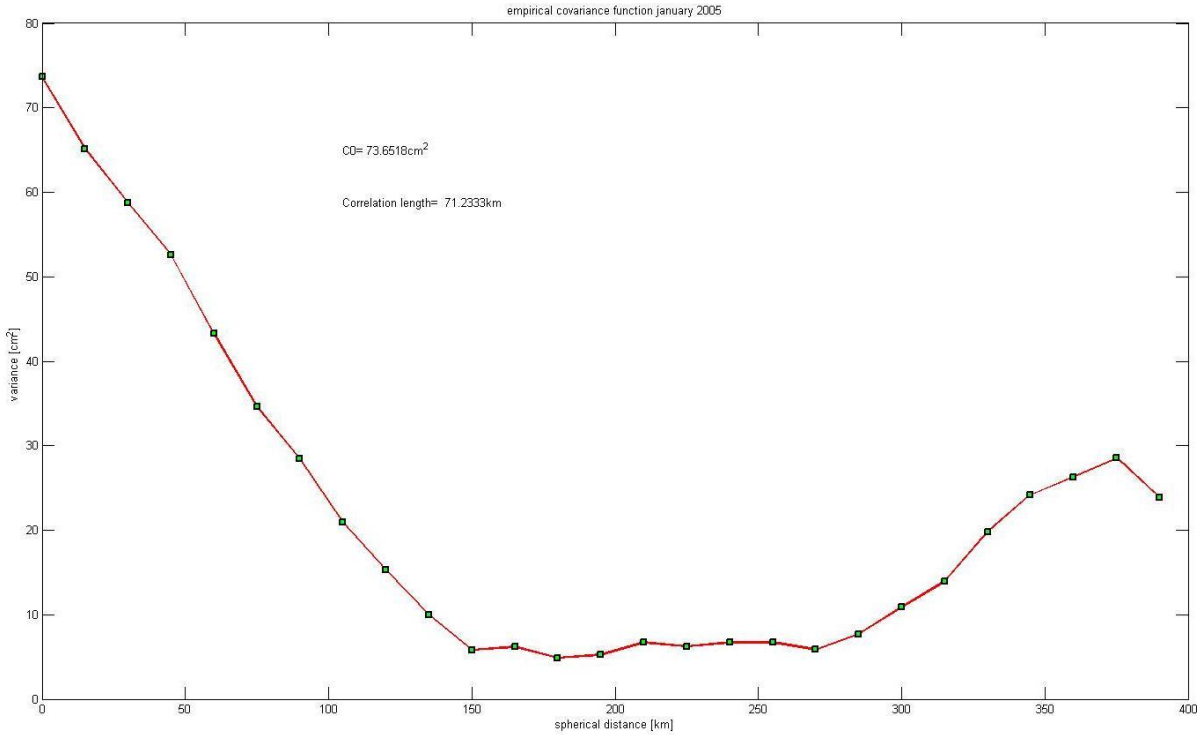
Τέλος, και το τελευταίο έτος μελέτης μας παρουσιάζει όμοια χαρακτηριστικά με τα υπόλοιπα. Η ελάχιστη τιμή επανέρχεται στα επίπεδα των δύο πρώτων ετών και δεν είναι μικρότερη των -40 cm. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο μικρότερο μήκος της διάβασης που παρουσιάστηκε καθώς το βόρειο ίχνος δεν πλησίασε αρκετά στην Κέρκυρα με αποτέλεσμα να μην εμφανιστούν οι ελάχιστες τιμές της περιοχής κοντά στο νησί. Η μέγιστη τιμή κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με τα προηγούμενα έτη και εντοπίζεται πάλι

βορειοανατολικά της Λιβύης. Η διακύμανση των τιμών ακολουθεί την πορεία των εποχών, φαινόμενο που θα γίνει πιο κατανοητό από τη μελέτη των ΣΣ στην επόμενη ενότητα. Γενικότερα, μέσα από τη μελέτη όλων των προηγούμενων σχημάτων, έγινε αντιληπτό πως η μεταβολή των τιμών της SLA είναι αρκετά ομαλή, με τις τοπικού χαρακτήρα διακυμάνσεις να οφείλονται σε μεμονωμένα τοπικά γεωφυσικά φαινόμενα και με την ατμοσφαιρική πίεση να αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες αυτών των μεταβολών (Νατσιόπουλος, 2010).

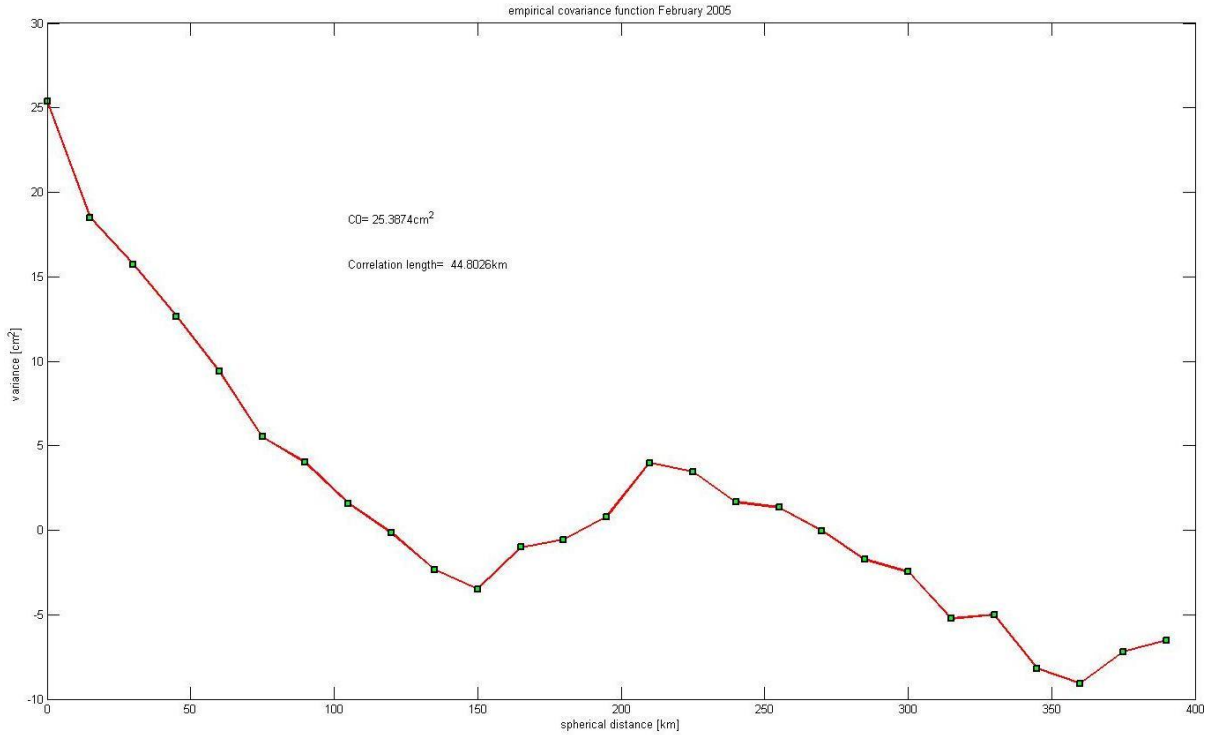
4.3 Εμπειρικές συναρτήσεις along track

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν οι εμπειρικές ΣΣ που δημιουργήθηκαν για τη δορυφορική διάβαση 444 σε μηνιαία βάση για την περίοδο 2005-2009. Οι συναρτήσεις αυτές υπολογίστηκαν με τη διαδικασία που έχουμε περιγράψει σε προηγούμενη ενότητα. Το βήμα των κλάσεων έχει οριστεί στα 15 km και το μήκος μέχρι το οποίο έχει υπολογιστεί και σχεδιαστεί η ΣΣ είναι τα 390 km. Σε κάθε Σχήμα αναγράφονται τα δύο χαρακτηριστικά μεγέθη της ΣΣ, η τιμή της μεταβλητότητας Co σε cm^2 και το μήκος συσχέτισης ξ σε km.

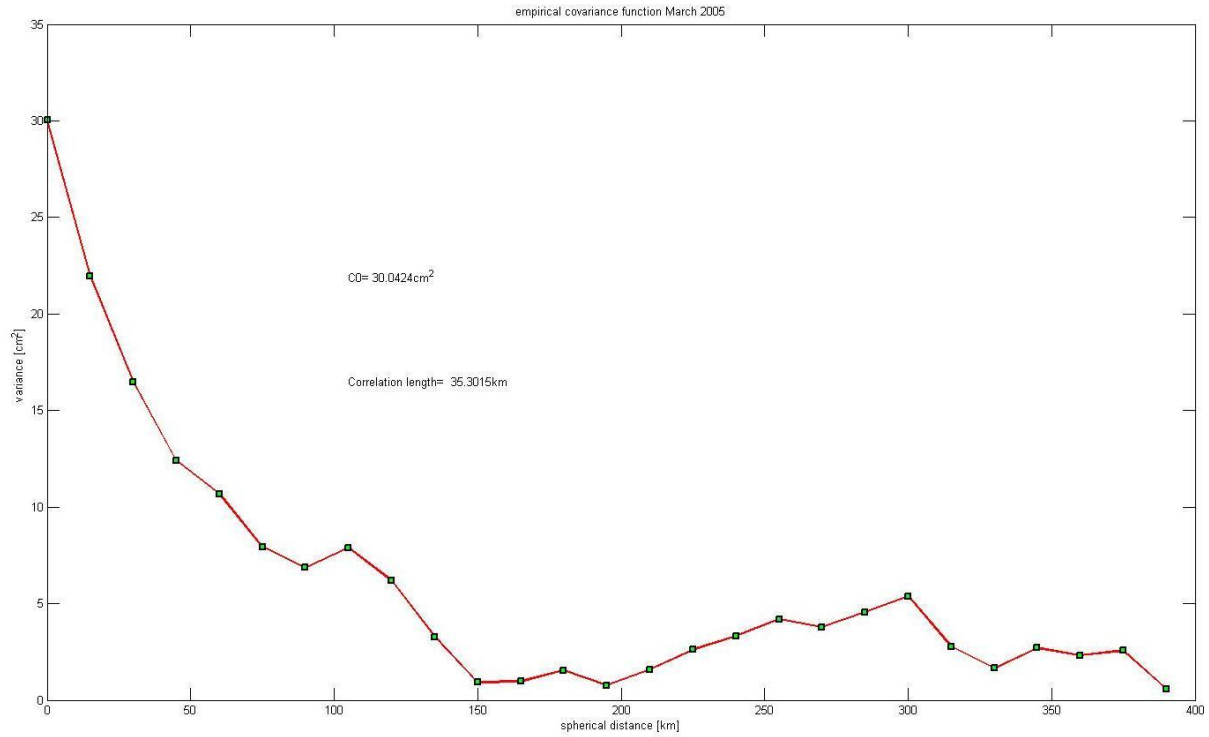
Εμπειρικές ΣΣ για το 2005



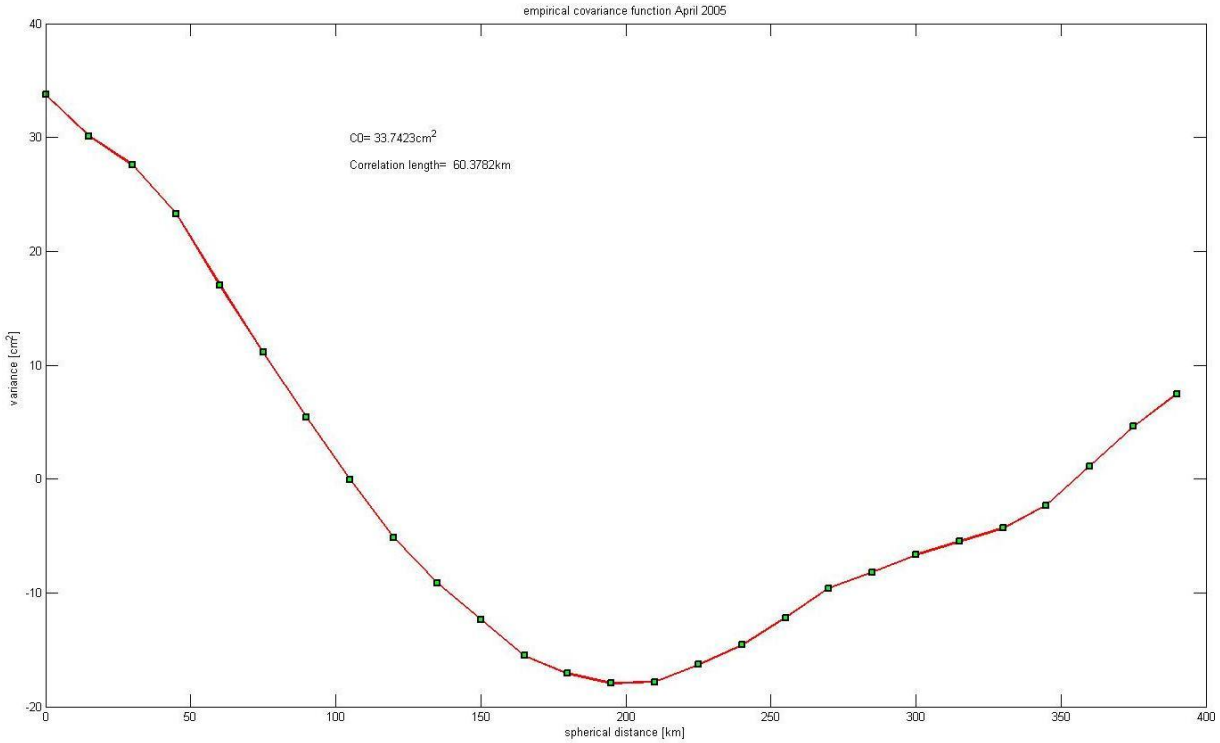
Σχήμα 4.53: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιανουάριο 2005



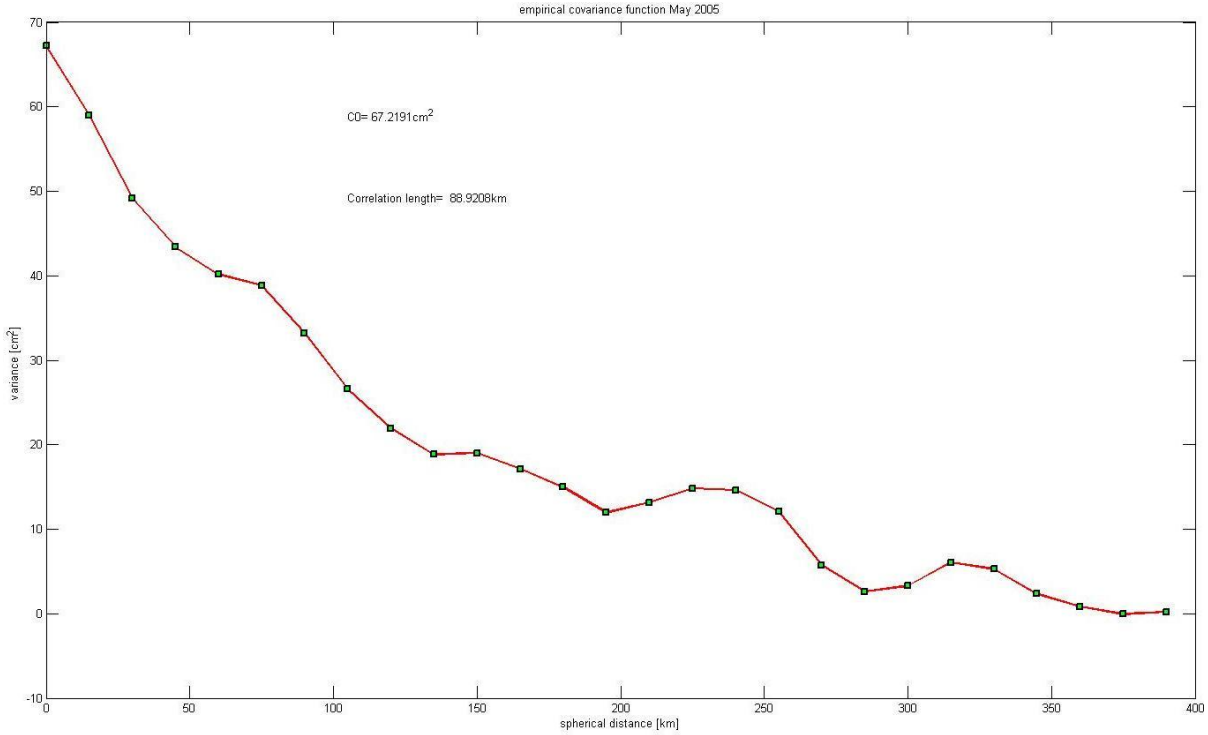
Σχήμα 4.54: Η εμπειρική ΣΣ για το Φεβρουάριο 2005



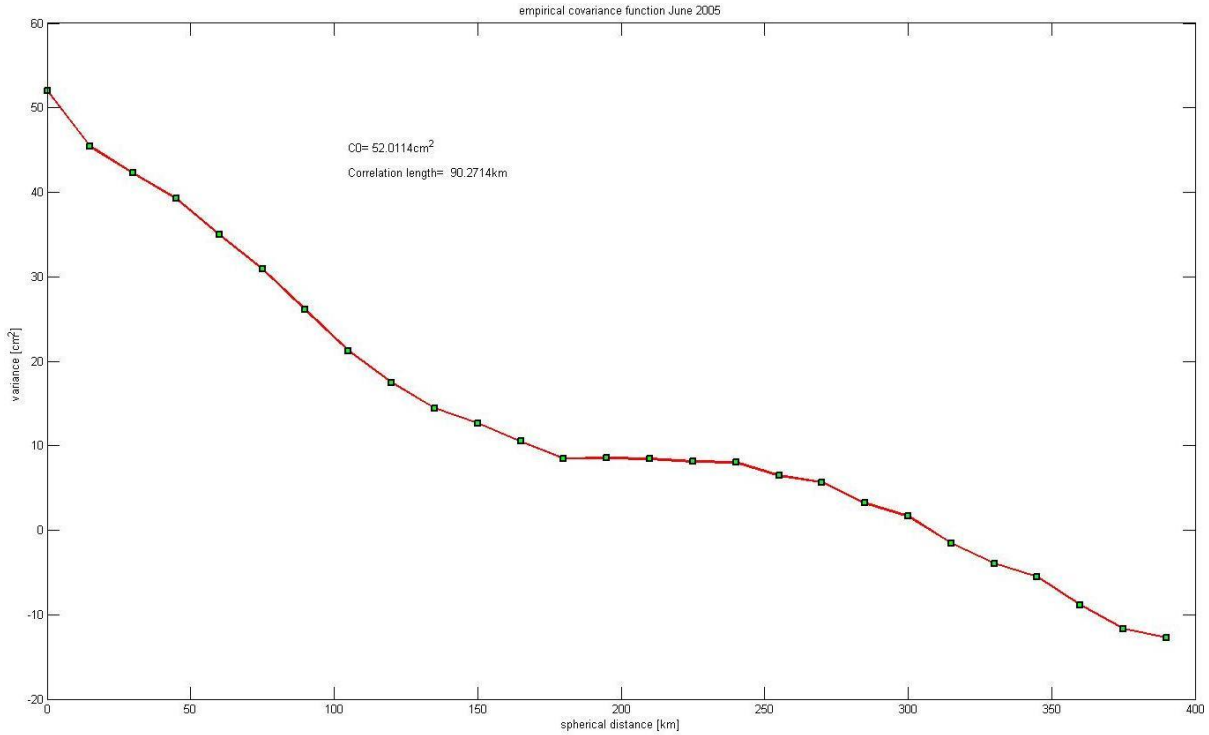
Σχήμα 4.55: Η εμπειρική ΣΣ για το Μάρτιο 2005



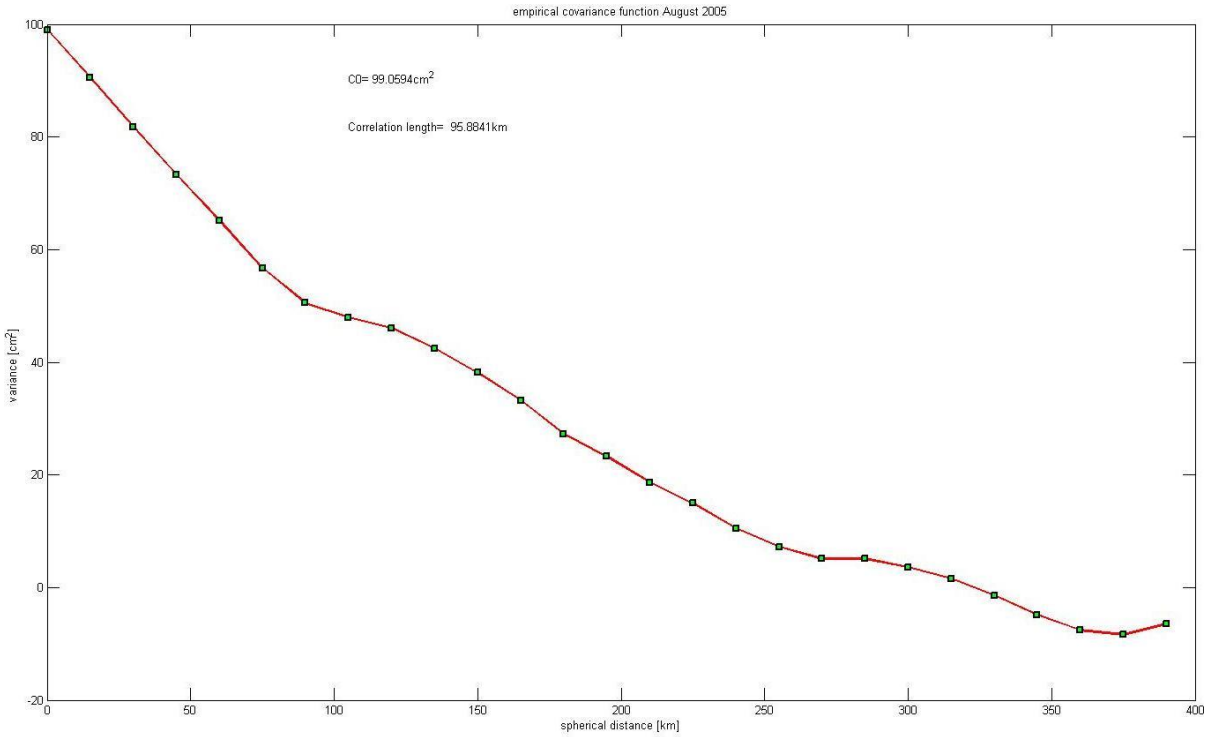
Σχήμα 4.56: Η εμπειρική ΣΣ για τον Απρίλιο 2005



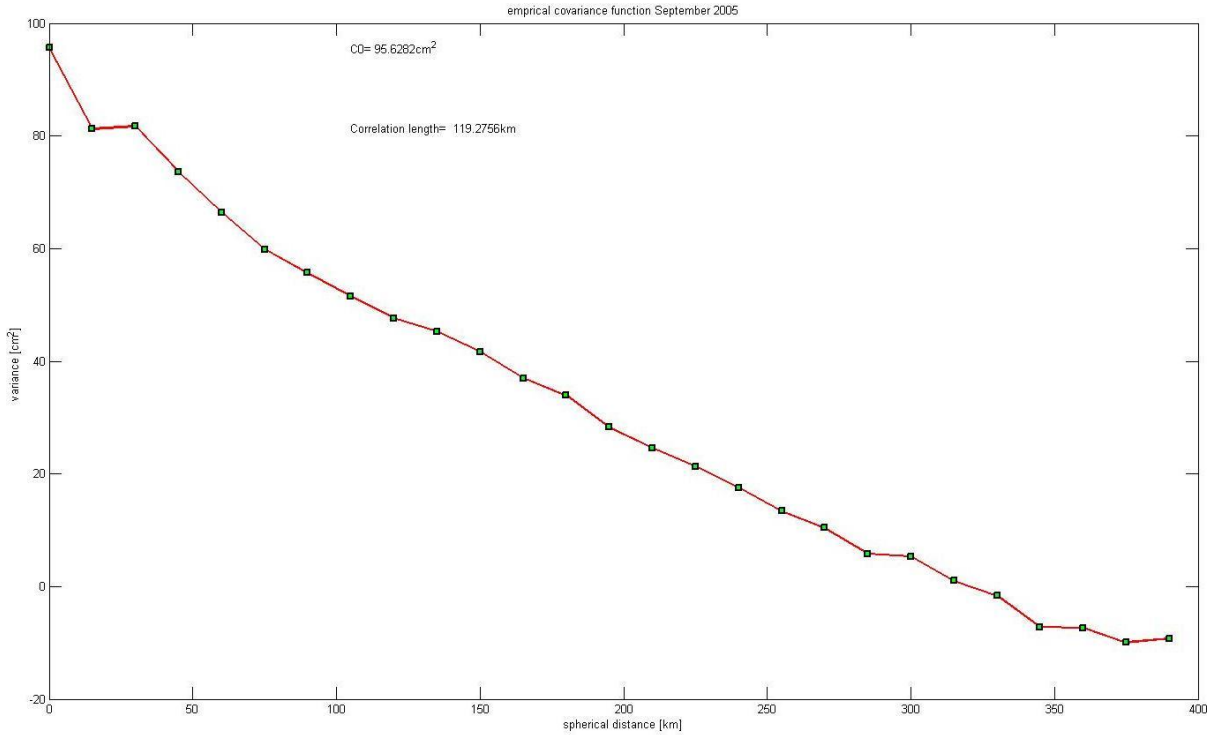
Σχήμα 4.57: Η εμπειρική ΣΣ για το Μάιο 2005



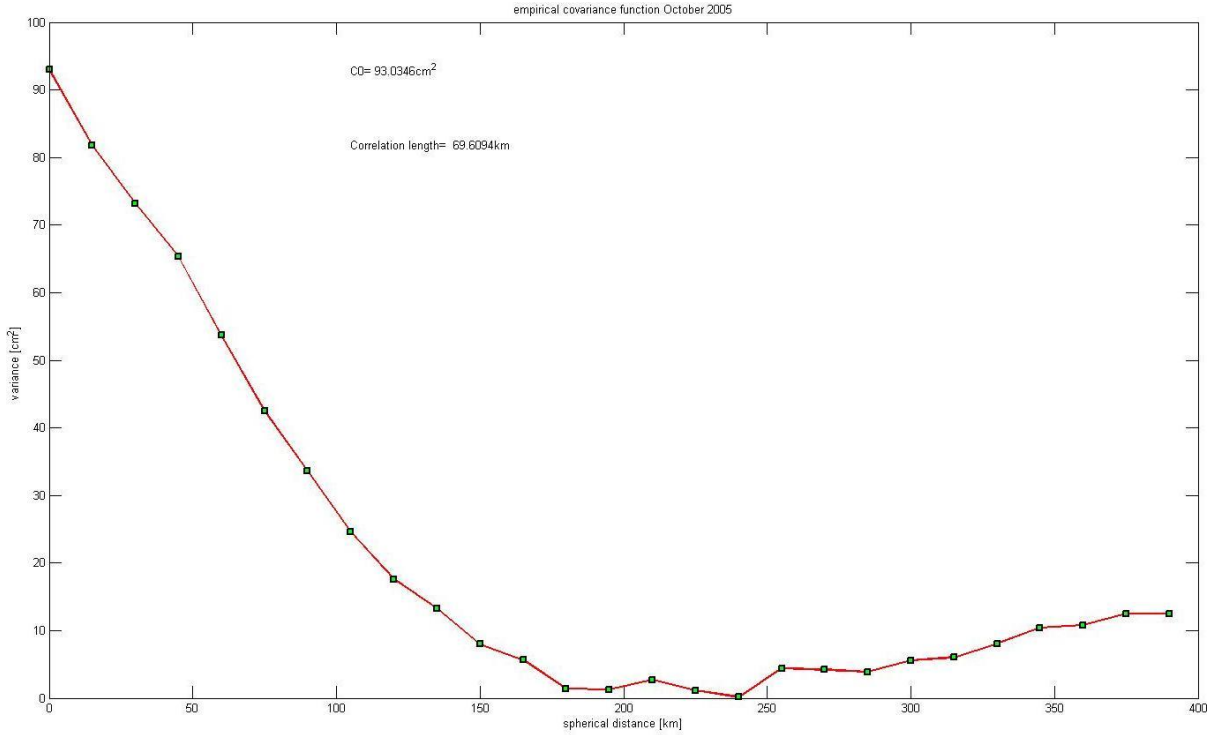
Σχήμα 4.58: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιούνιο 2005



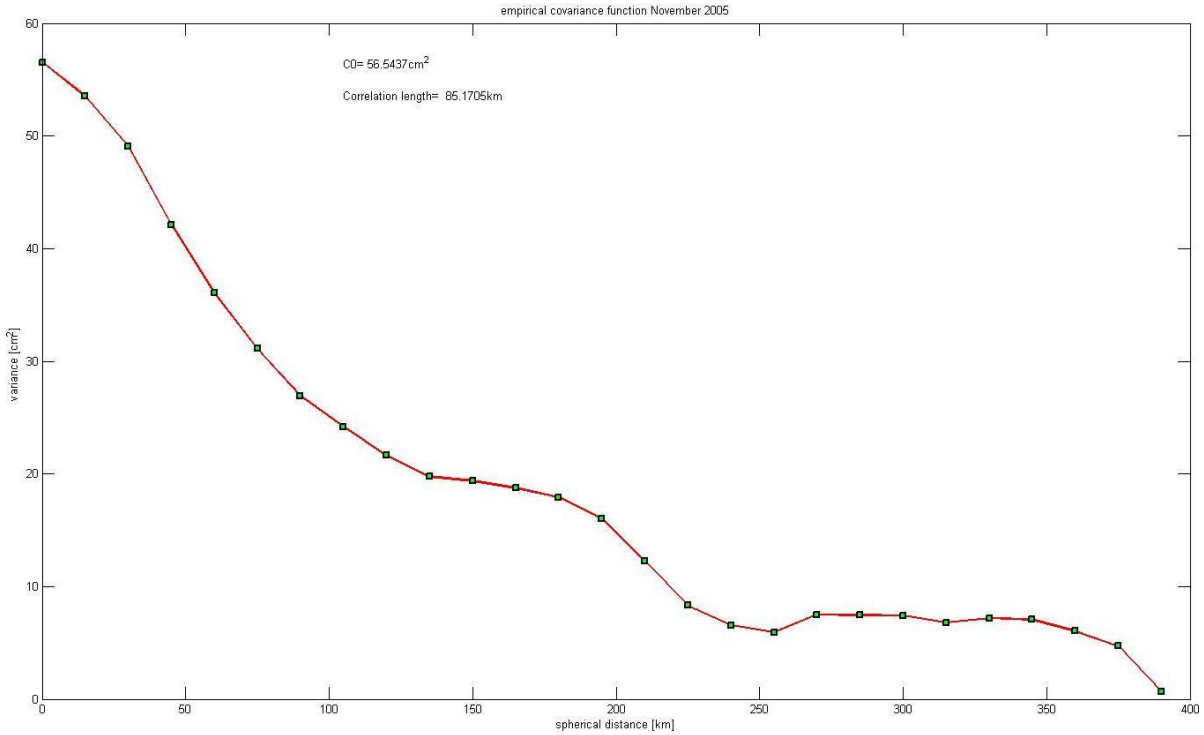
Σχήμα 4.59: Η εμπειρική ΣΣ για τον Αύγουστο 2005



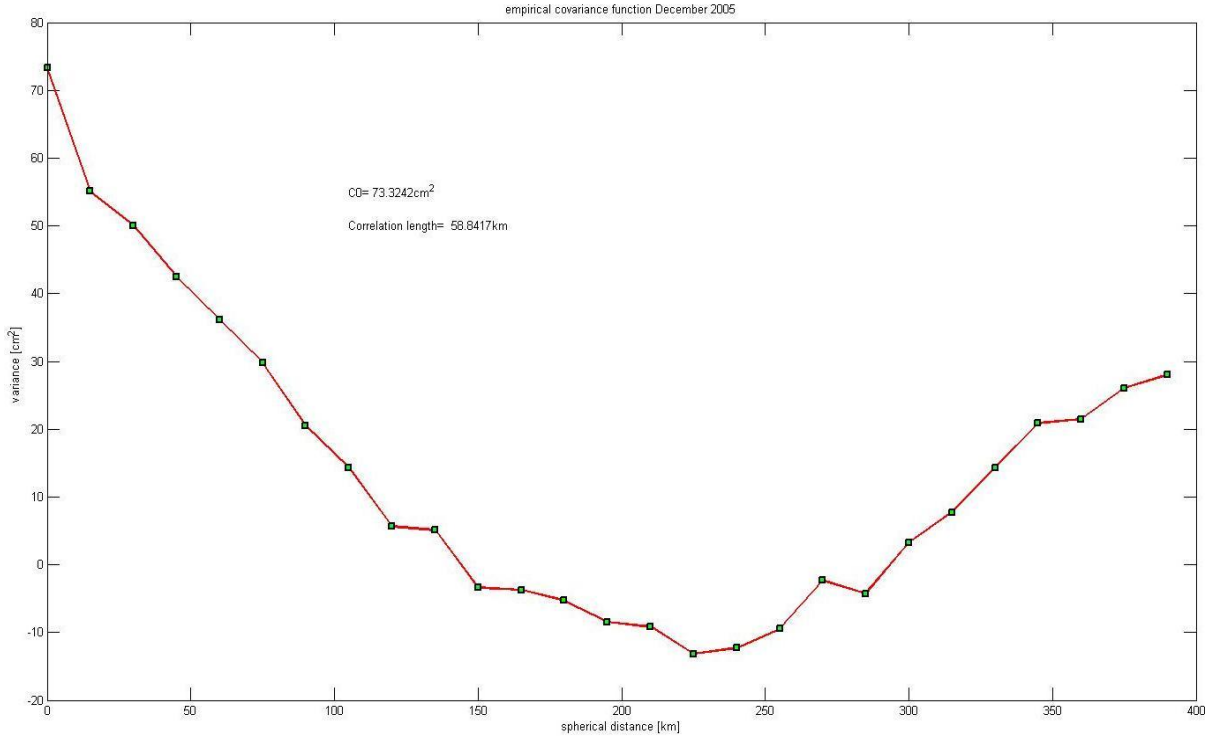
Σχήμα 4.60: Η εμπειρική ΣΣ για το Σεπτέμβριο 2005



Σχήμα 4.61: Η εμπειρική ΣΣ για τον Οκτώβριο 2005



Σχήμα 4.62: Η εμπειρική ΣΣ για το Νοέμβριο 2005

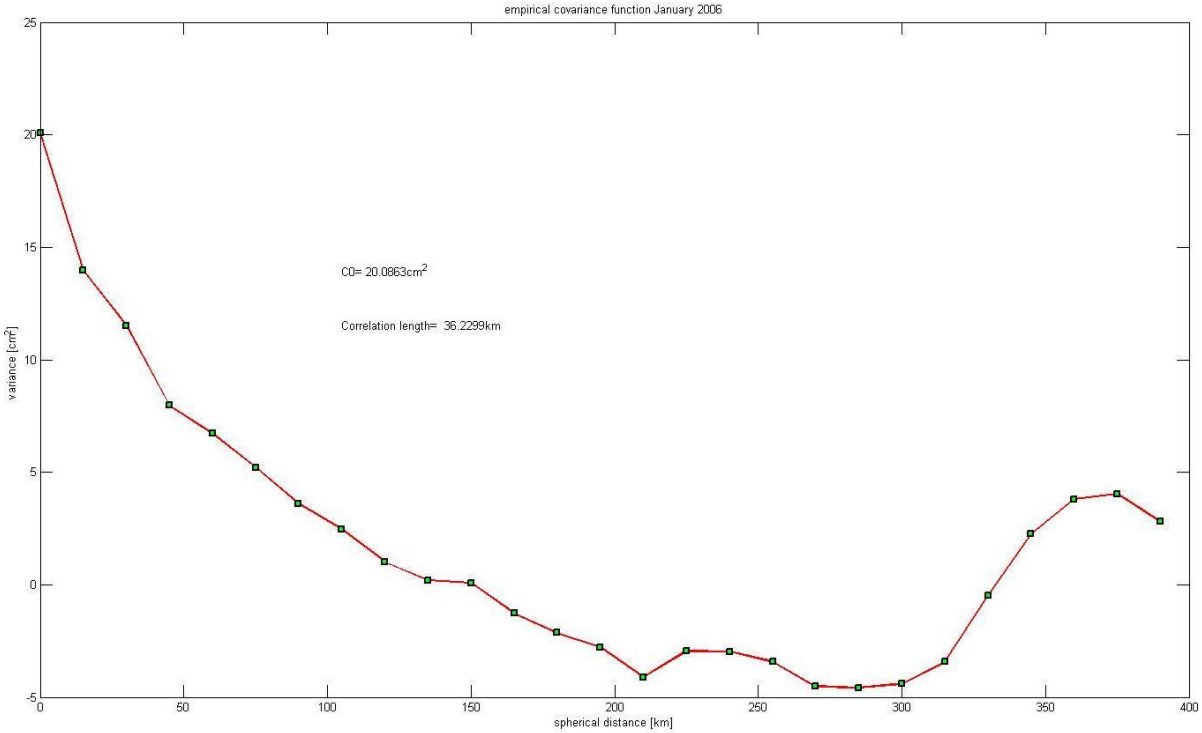


Σχήμα 4.63: Η εμπειρική ΣΣ για το Δεκέμβριο 2005

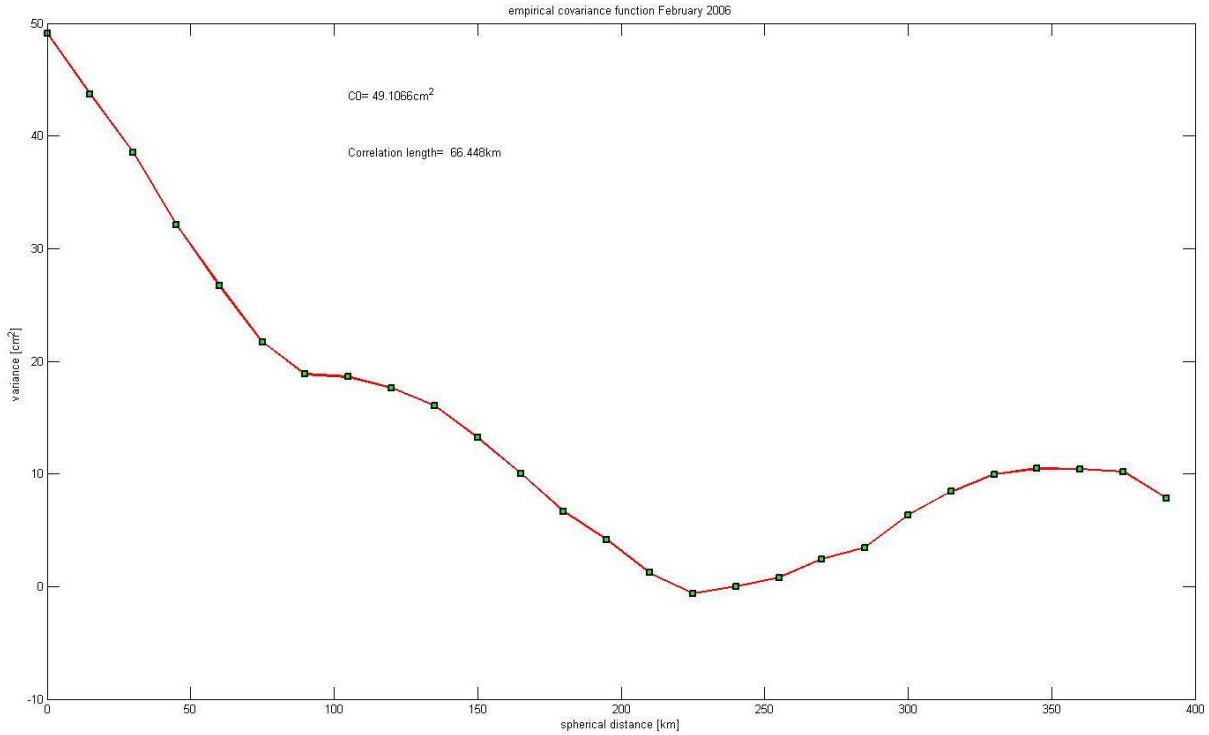
Από τη μελέτη των εμπειρικών ΣΣ του 2005 ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταβολή των τιμών της μεταβλητότητας Co κατά τη διάρκεια του έτους. Η μεταβλητότητα μεταβάλλεται από 74 cm^2 τον Ιανουάριο σε ~30 cm^2 το Φεβρουάριο, το Μάρτιο και τον Απρίλιο ανεβαίνει ξανά σε 67 cm^2 το Μάιο και 52 cm^2 τον Ιούνιο, παίρνει τις μέγιστες τιμές της περίπου στα 95 cm^2 τον Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο και μειώνεται πάλι σε 56 cm^2 και 73 cm^2 το Νοέμβριο και το Δεκέμβριο. Η μεταβολή αυτή ακολουθεί τη θερμική διαστολή της θάλασσας λόγω της αύξησης των θερμοκρασιών το καλοκαίρι και τις αρχές του φθινοπώρου και μειώνεται τον χειμώνα εξαιτίας της πτώσης της θερμοκρασίας. Επιπλέον, η διακύμανση αυτή μπορεί να αποδοθεί στη μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης στη Μεσόγειο. Σε άλλο κεφάλαιο θα εξεταστεί η μεταβολή της μεταβλητότητας σε σχέση με γνωστούς κλιματικούς δείκτες SOI, NAO και MOI.

Όσον αφορά τη μορφή των ΣΣ, οι περισσότερες από τις συναρτήσεις ακολουθούν την τυπική μορφή μιας ΣΣ. Ξεκινούν από μία μέγιστη τιμή και τείνουν σταδιακά προς το μηδέν. Οι ανωμαλίες που εντοπίζονται στα σχήματα εμφανίζονται μετά τα 300 km, κάτι που είναι λογικό αν σκεφτούμε πως το μήκος της διάβασης είναι ~500 km και επομένως για αποστάσεις μεγαλύτερες από 300 km αναμένονται αποτελέσματα τα οποία δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Η λογική μορφή των ΣΣ αποτυπώνεται και στη μεταβολή του μήκους συσχέτισης ξ. Οι μεγαλύτερες τιμές του μήκους συσχέτισης (~100 km) εμφανίζονται στους μήνες όπου η μεταβλητότητα Co έχει την μέγιστη τιμή, ενώ γενικότερα σε όλες τις συναρτήσεις του έτους η τιμή του ξ μεταβάλλεται ανάλογα με το μέγεθος της Co.

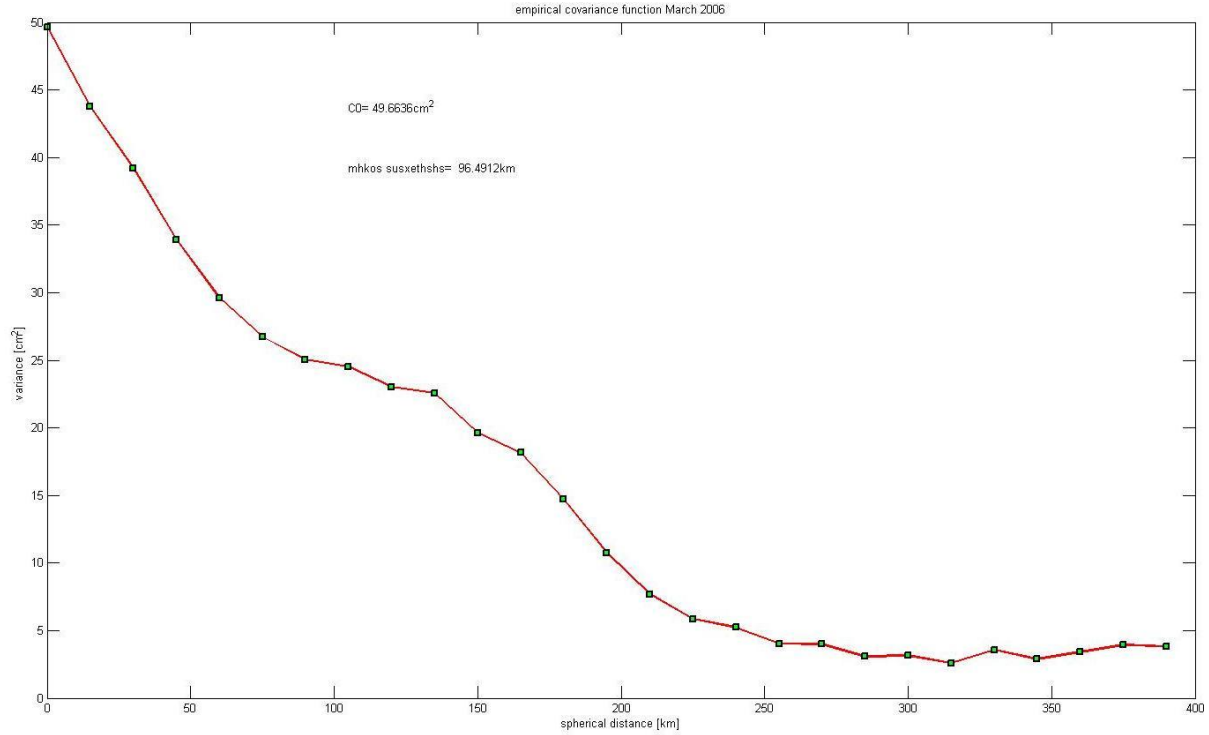
Εμπειρικές ΣΣ για το 2006



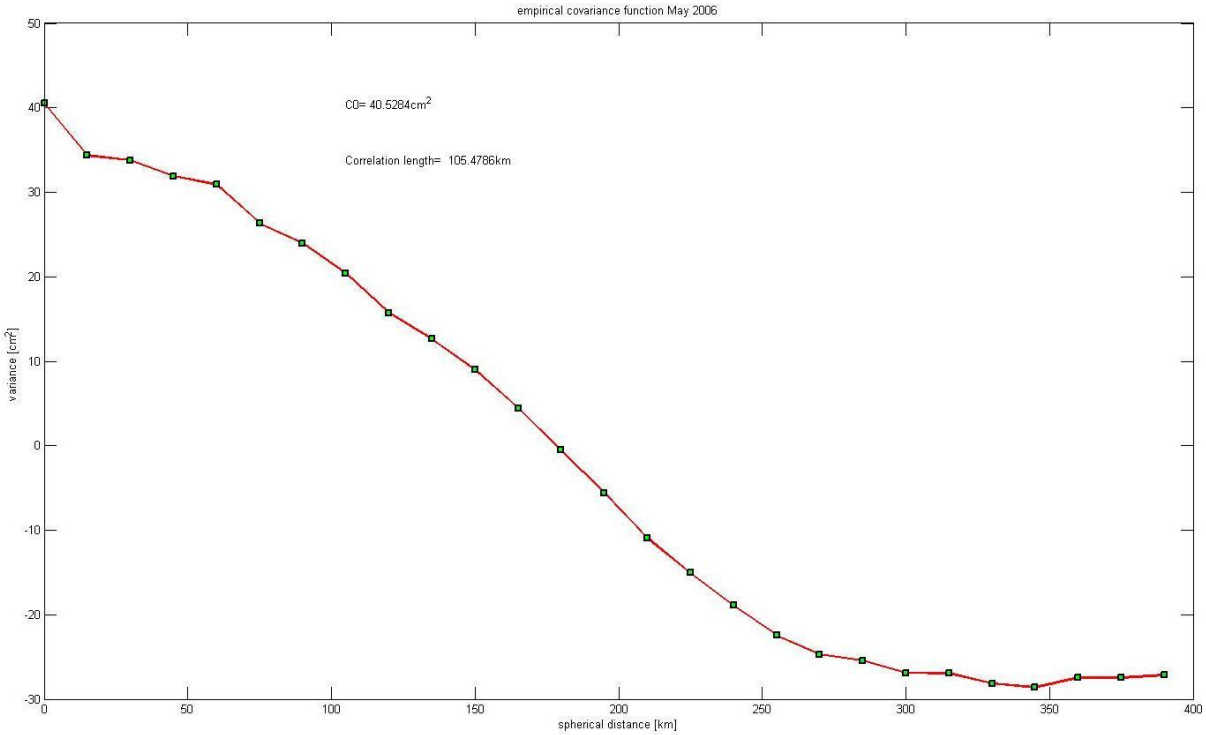
Σχήμα 4.64: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιανουάριο 2006



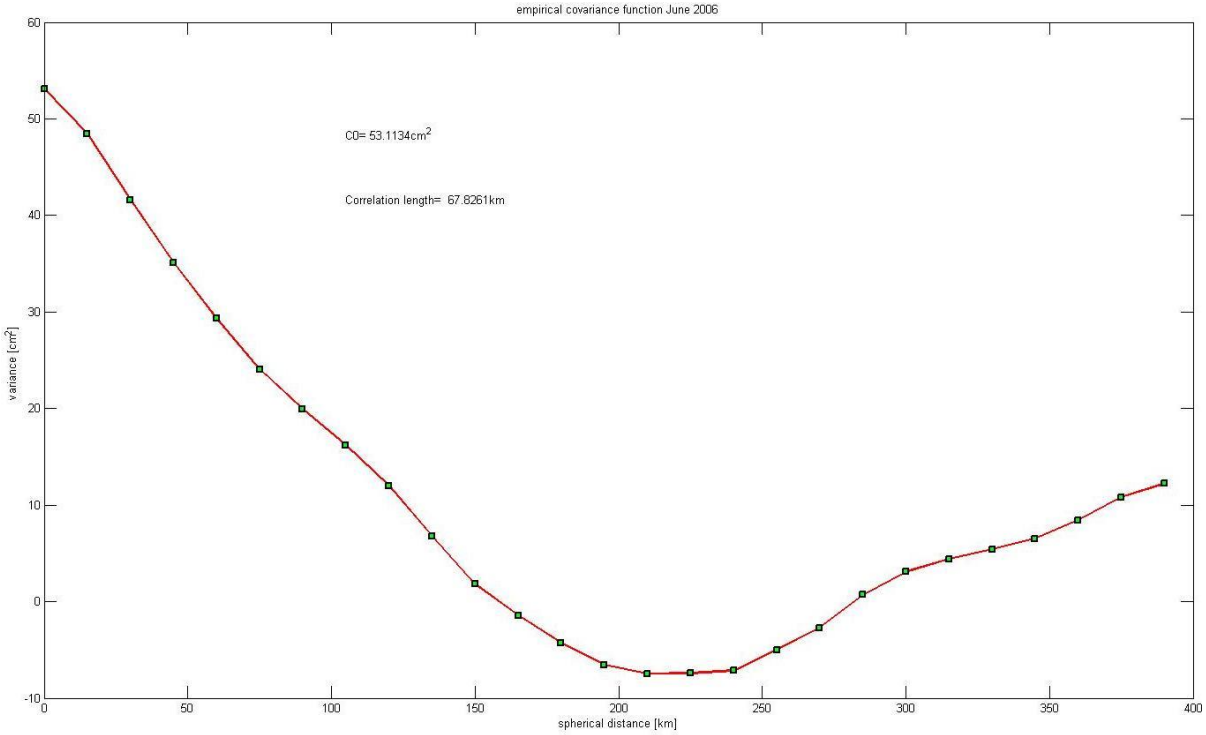
Σχήμα 4.65: Η εμπειρική ΣΣ για το Φεβρουάριο 2006



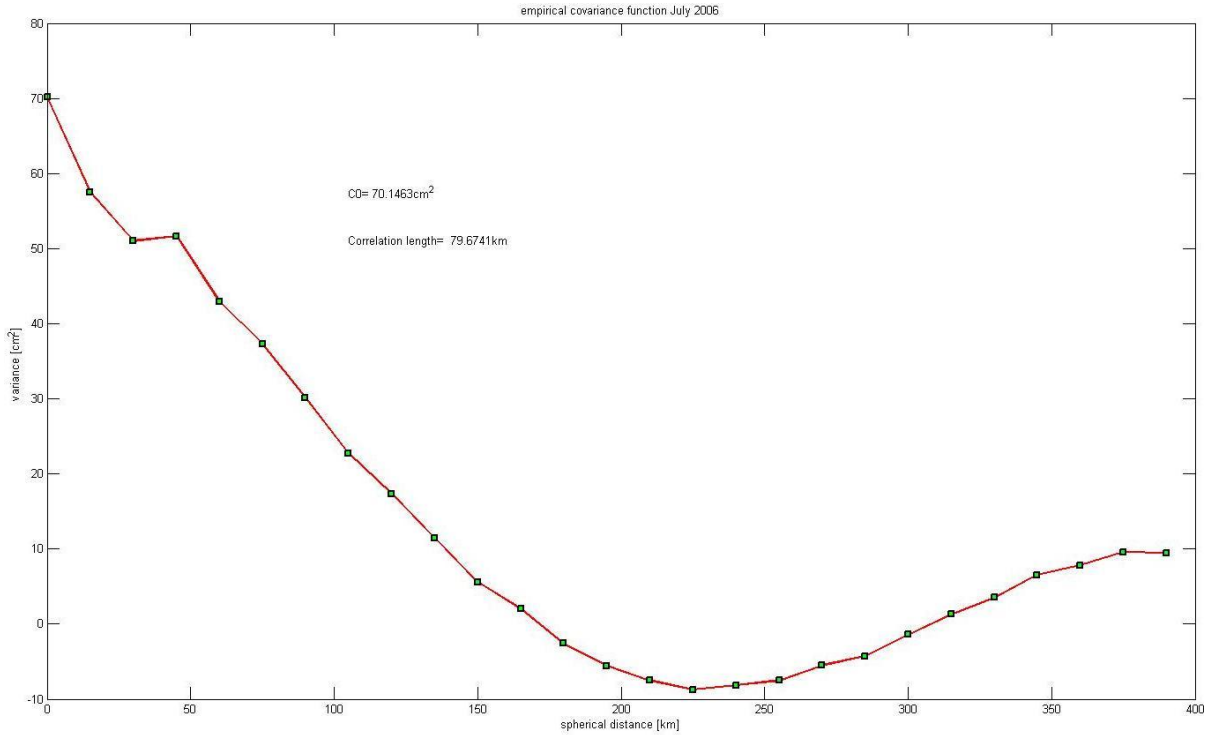
Σχήμα 4.66: Η εμπειρική ΣΣ για το Μάρτιο 2006



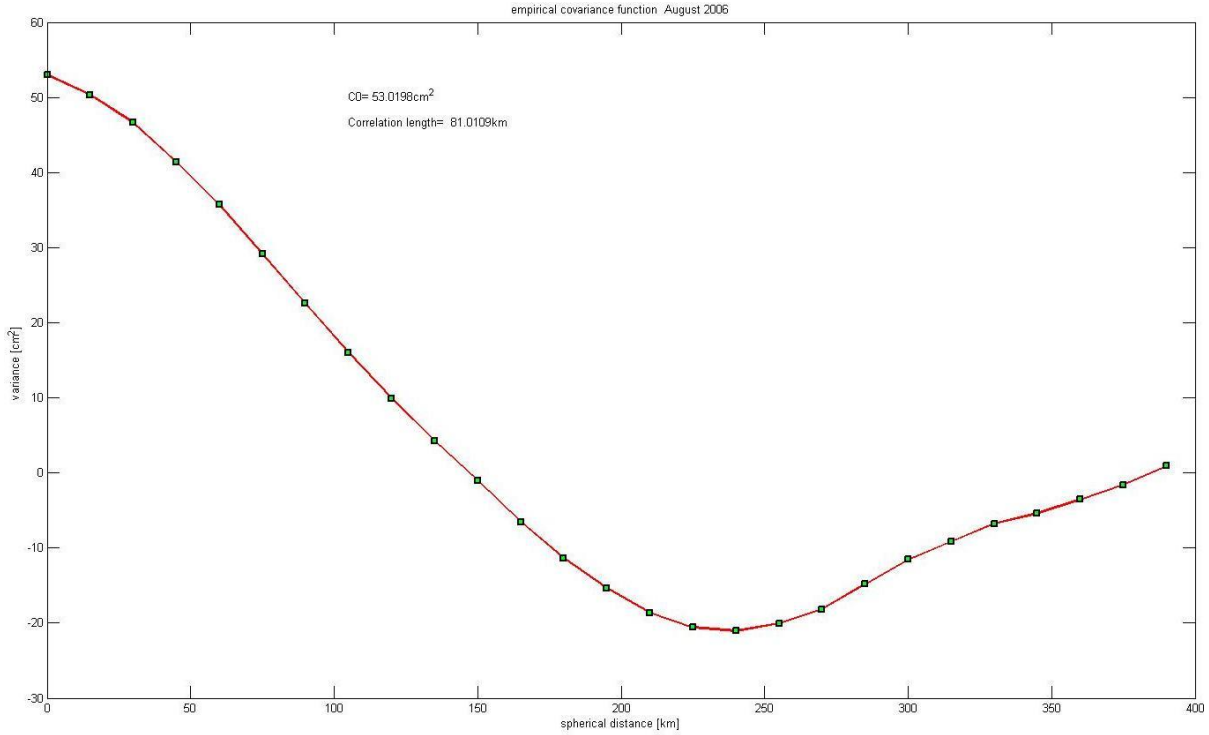
Σχήμα 4.67: Η εμπειρική ΣΣ για το Μάιο 2006



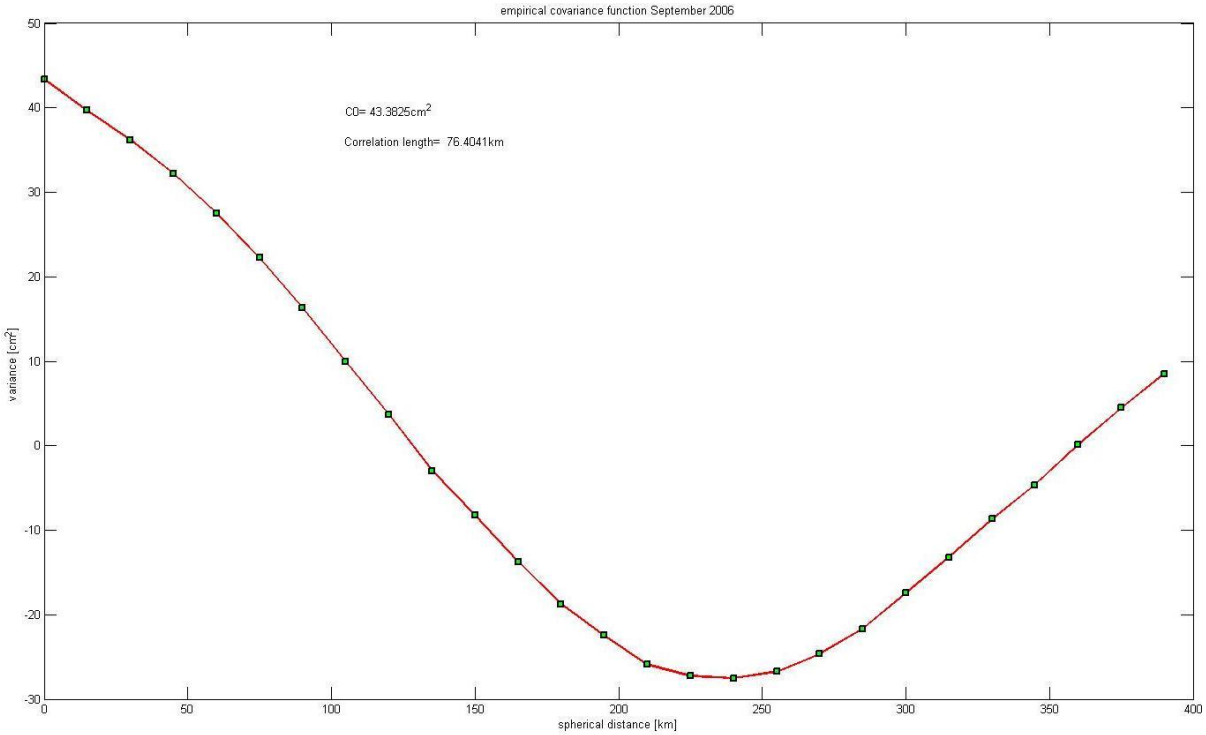
Σχήμα 4.68: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιούνιο 2006



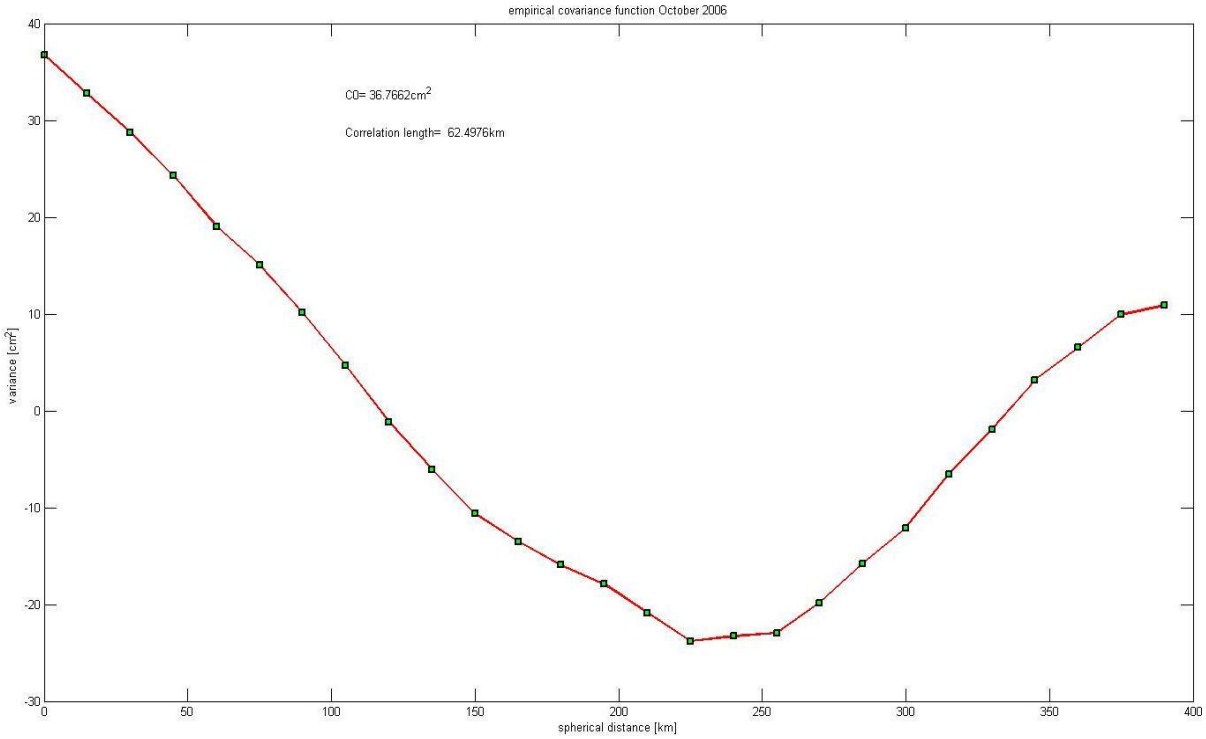
Σχήμα 4.69: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιούλιο 2006



Σχήμα 4.70: Η εμπειρική ΣΣ για τον Αύγουστο 2006



Σχήμα 4.71: Η εμπειρική ΣΣ για το Σεπτέμβριο 2006

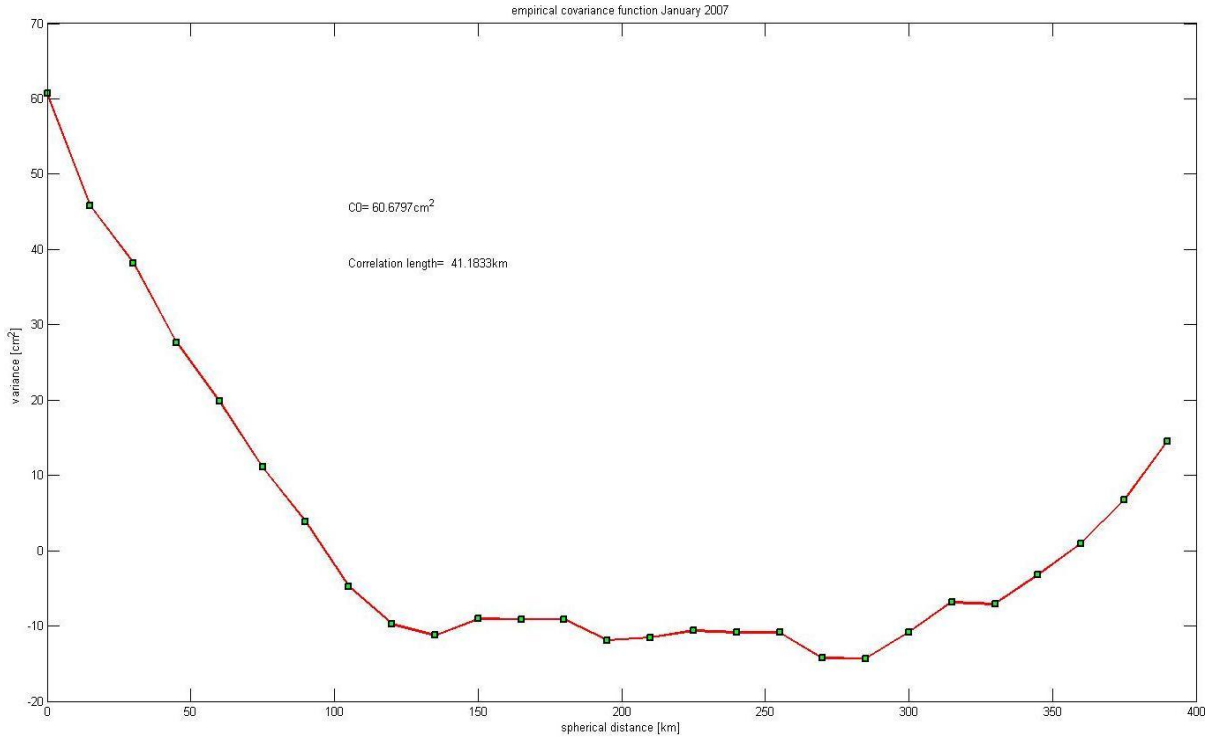


Σχήμα 4.72: Η εμπειρική ΣΣ για τον Οκτώβριο 2006

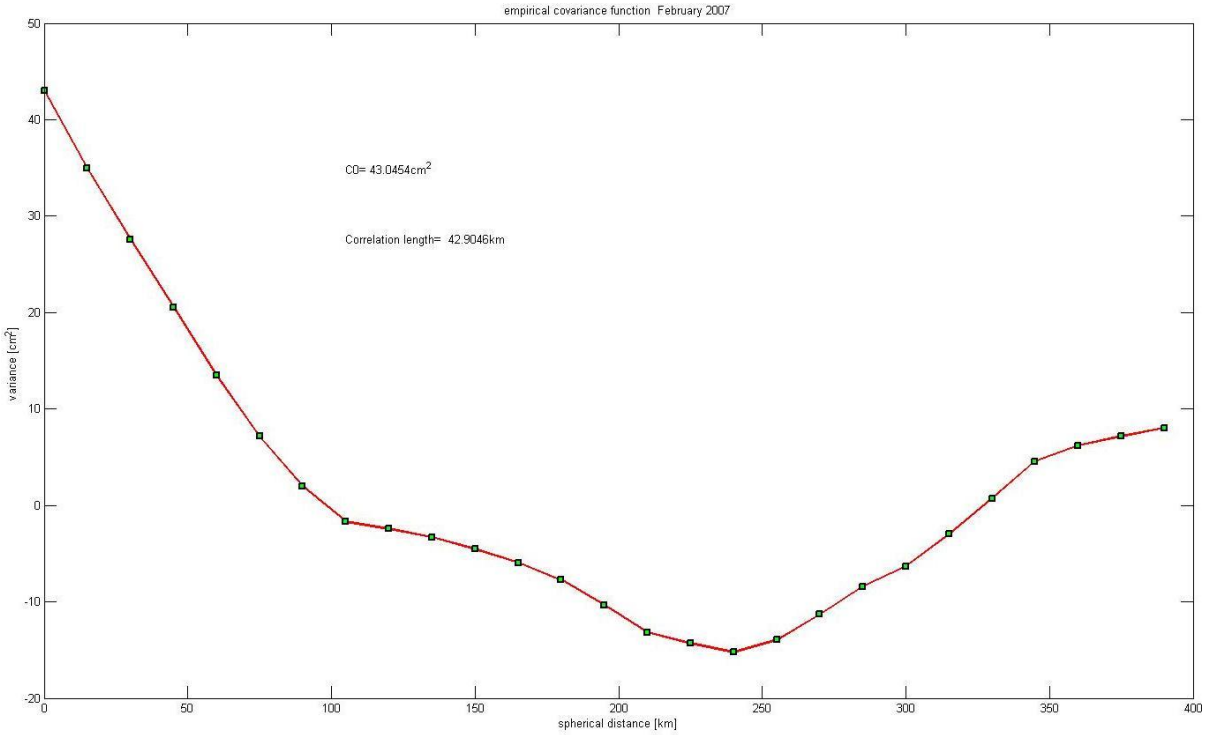
Το 2006 η μεταβλητότητα ακολουθεί τη μεταβολή του 2005 με τις τιμές της να είναι σαφώς μικρότερες από τις αντίστοιχες που παρατηρήθηκαν το 2005. Ειδικότερα, οι μέγιστες διαφορές παρατηρούνται τον Ιανουάριο (74 cm^2 το 2005 έναντι 20 cm^2 το 2006) αλλά και τον Οκτώβριο (από 95 cm^2 σε 36 cm^2). Οι διαφορές που παρατηρούνται από τη μία χρονιά στην άλλη είναι αρκετά μεγάλες και η εμφάνισήτους συνεπάγεται έντονα μετεωρολογικά και κλιματικά φαινόμενα στην περιοχή. Πράγματι, όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο, τον Μάρτιο του 2006 παρουσιάστηκε το φαινόμενο El Niño, με τα αποτελέσματά του να γίνονται εμφανή λίγο αργότερα με απότομη αύξηση της τιμής της SLA τον Ιούνιο και τον Ιούλιο.

Οι τιμές του μήκους συσχέτισης είναι γενικότερα μικρότερες από τις αντίστοιχες που παρατηρήθηκαν το προηγούμενο έτος (2005), ακολουθώντας τη μεταβολή των μεταβλητοτήτων. Η ΣΣ για τον Μάιο του 2006 (Σχήμα 4.67) με το μεγάλο αριθμό αρνητικών τιμών και την απουσία της διακύμανσης των τιμών γύρω από το μηδέν οφείλεται στον μικρό αριθμό δεδομένων της διάβασης το συγκεκριμένο μήνα και την ασυνέχεια που παρατηρείται στο ίχνος της διάβασης. Ειδικότερα, η συγκεκριμένη διάβαση είχε μόνο 86 εγγραφές ενώ η πλειοψηφία των υπολοίπων είχε ~120-130.

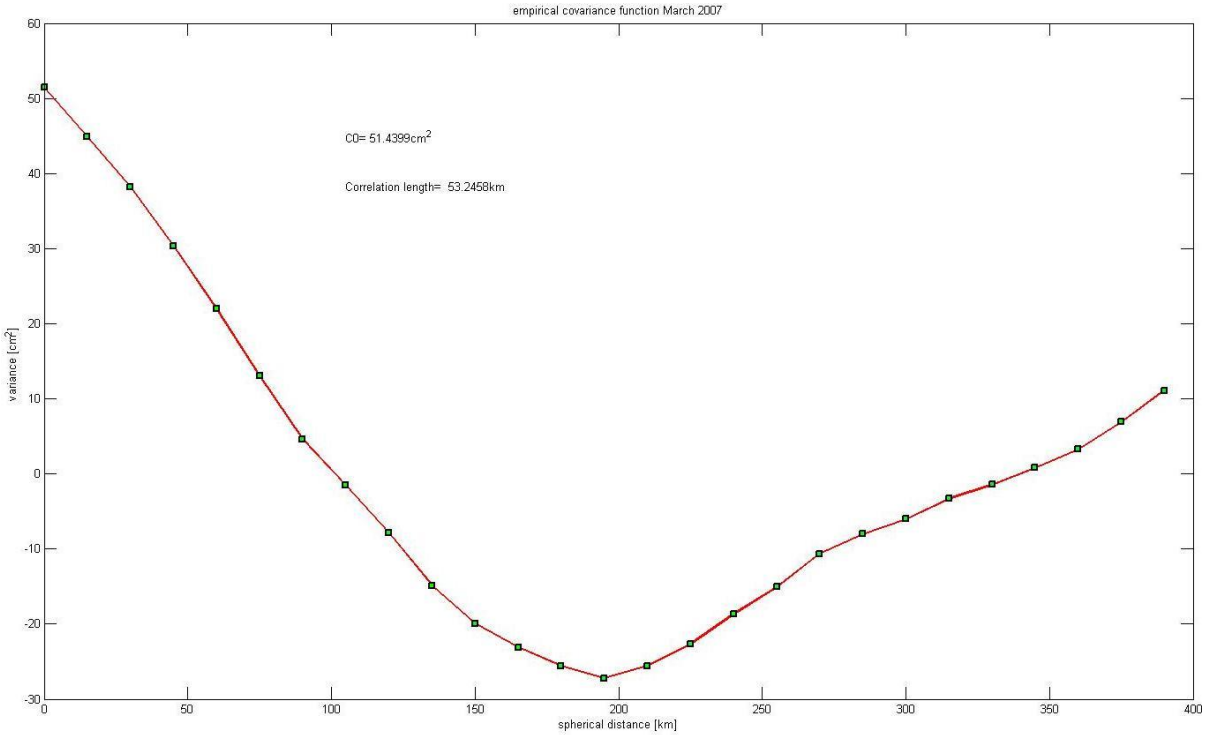
Εμπειρικές ΣΣ για το 2007



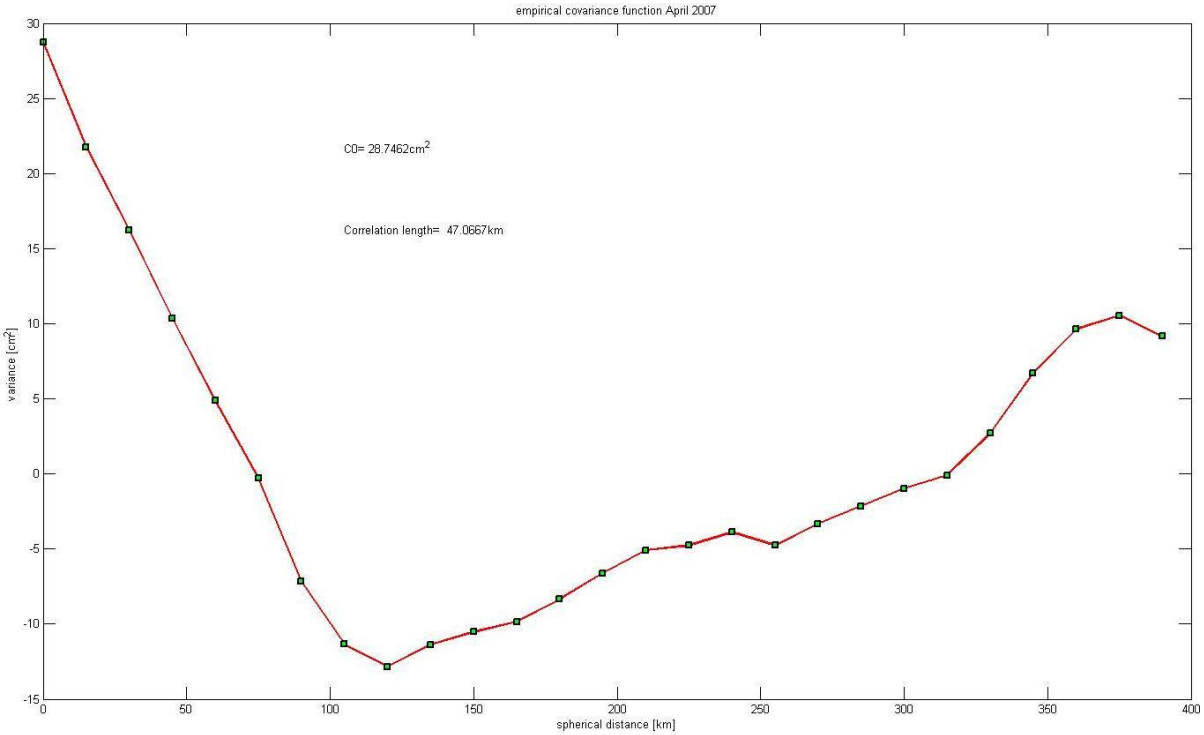
Σχήμα 4.73: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιανουάριο 2007



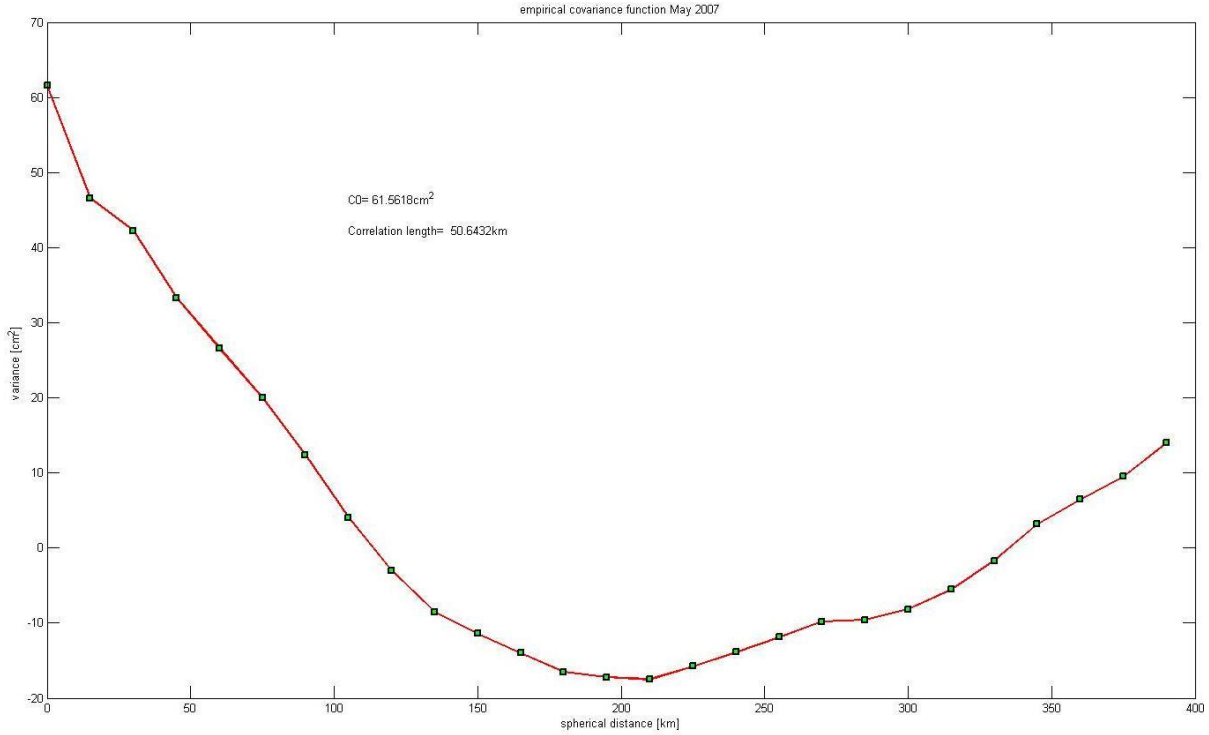
Σχήμα 4.74: Η εμπειρική ΣΣ για το Φεβρουάριο 2007



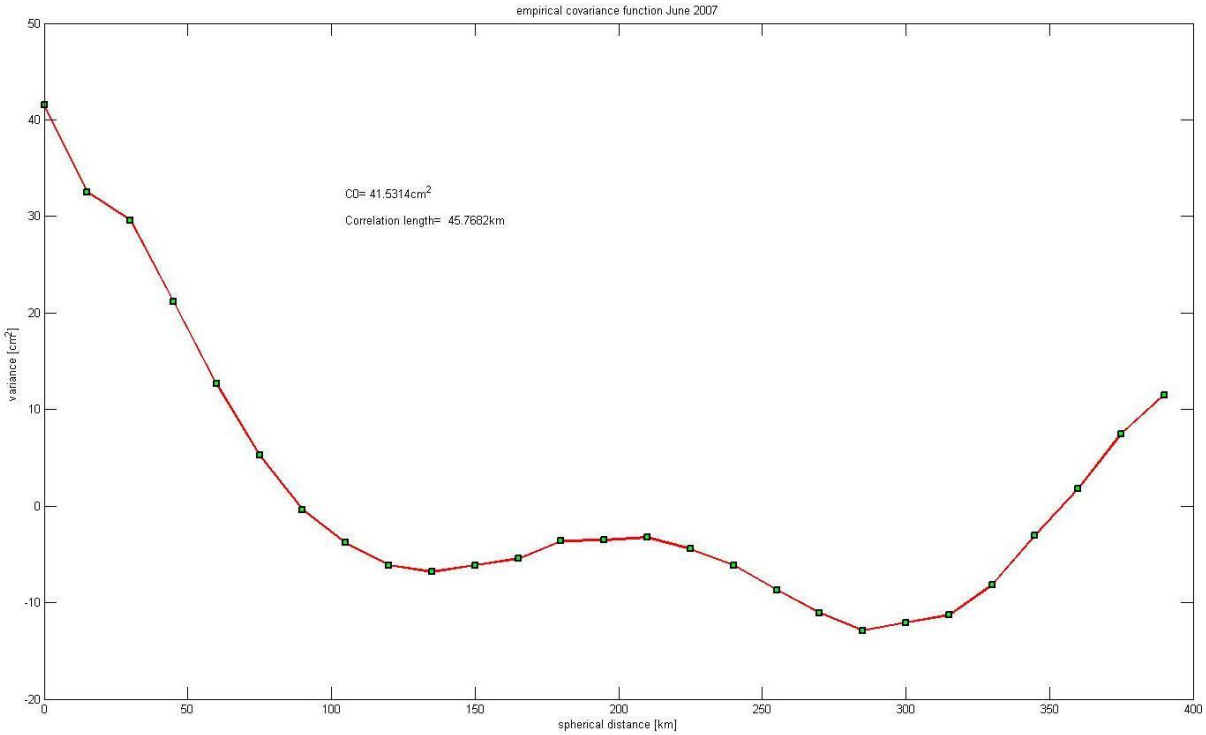
Σχήμα 4.75: Η εμπειρική ΣΣ για το Μάρτιο 2007



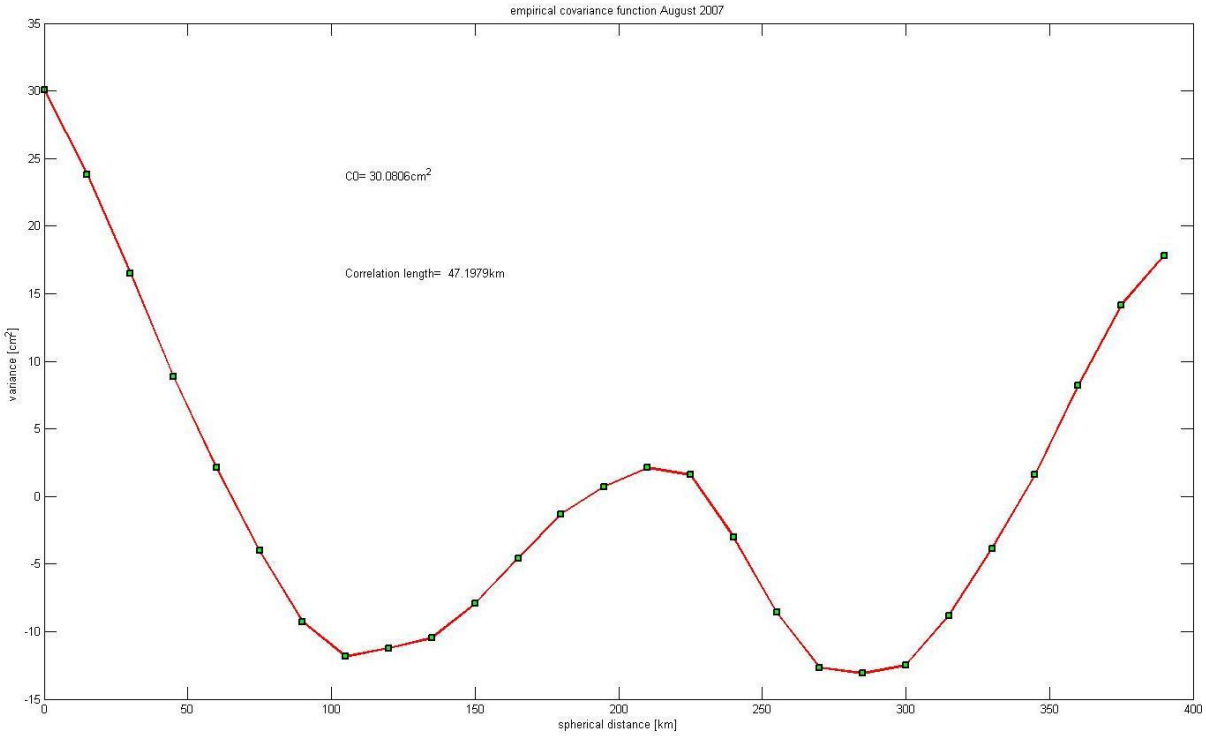
Σχήμα 4.76: Η εμπειρική ΣΣ για τον Απρίλιο 2007



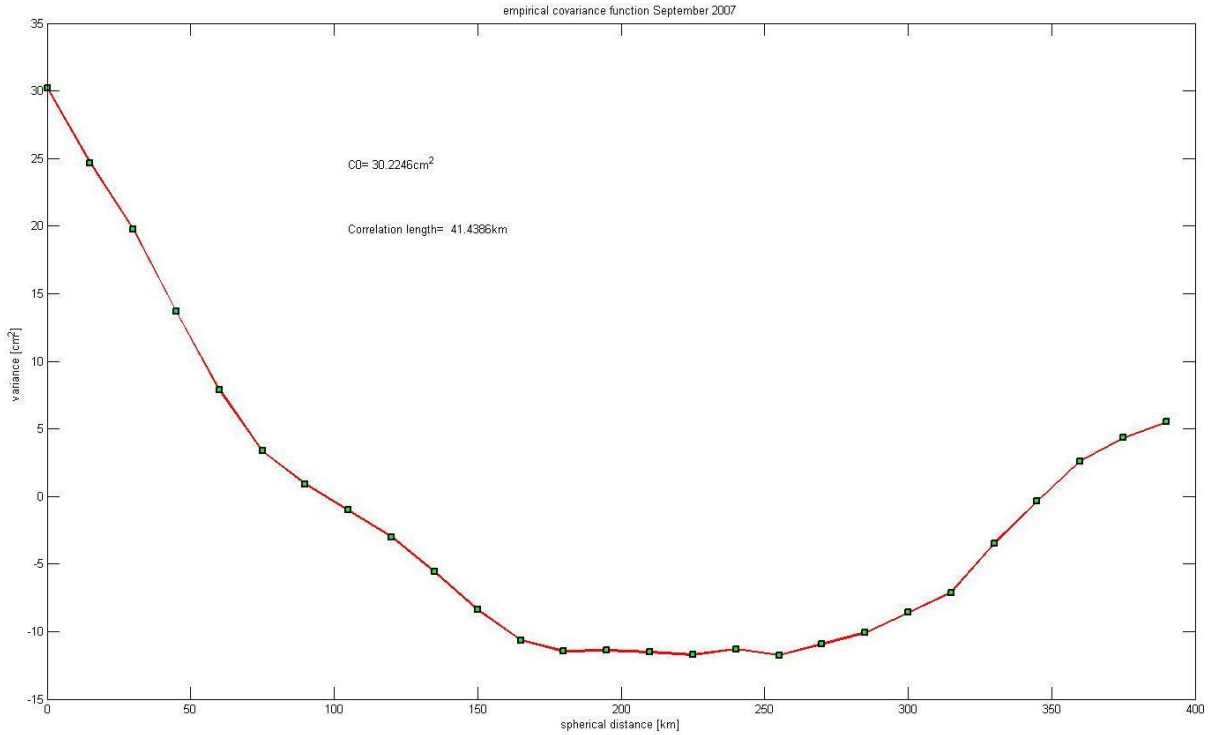
Σχήμα 4.77: Η εμπειρική ΣΣ για το Μάιο 2007



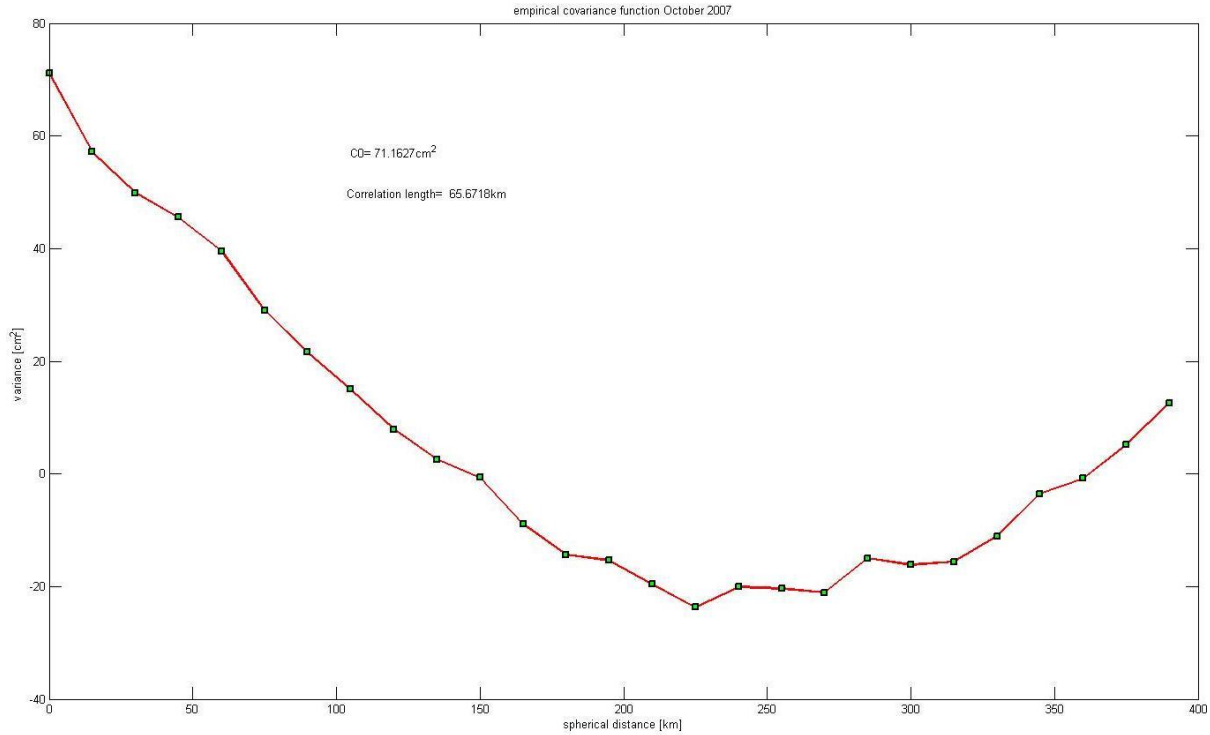
Σχήμα 4.78: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιούνιο 2007



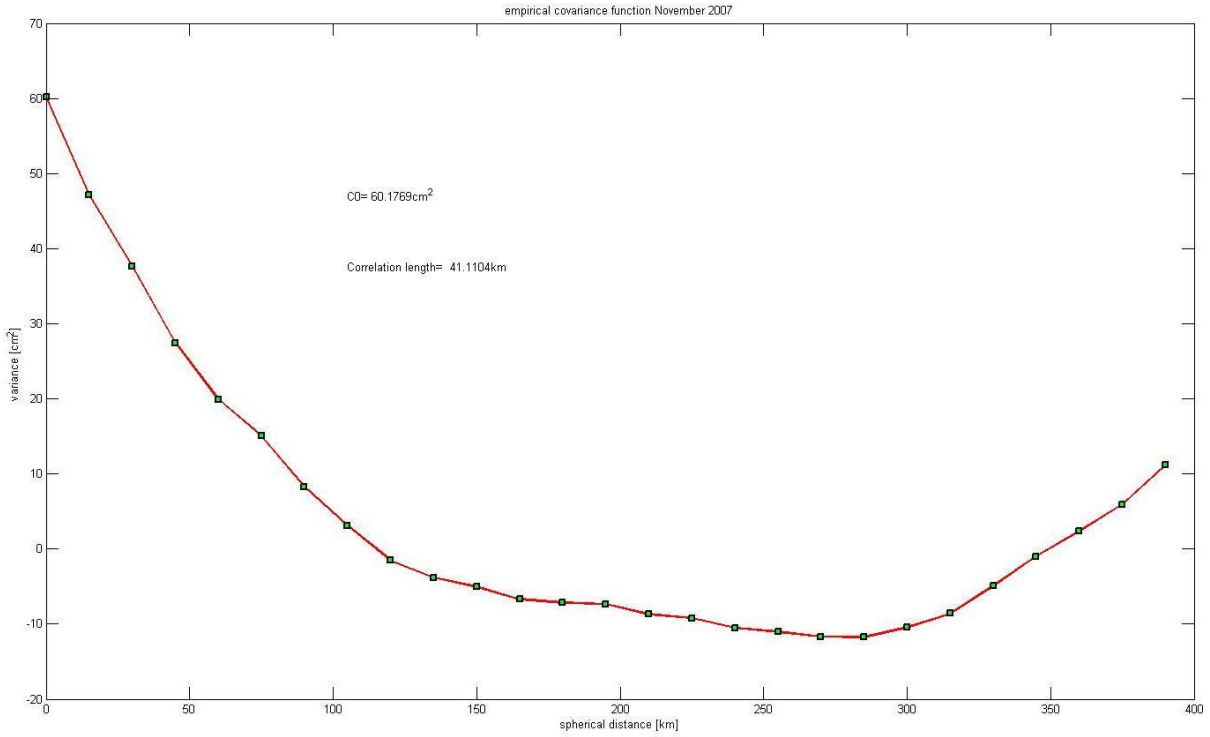
Σχήμα 4.79: Η εμπειρική ΣΣ για τον Αύγουστο 2007



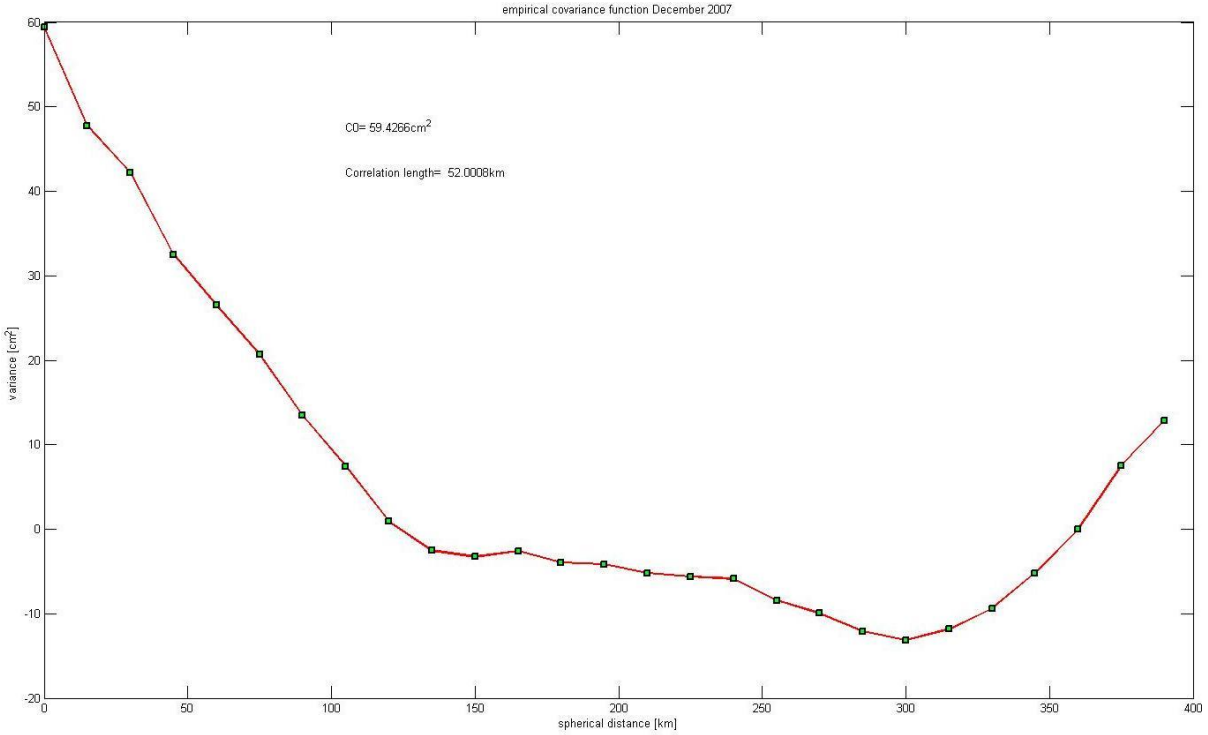
Σχήμα 4.80: Η εμπειρική ΣΣ για το Σεπτέμβριο 2007



Σχήμα 4.81: Η εμπειρική ΣΣ για τον Οκτώβριο 2007



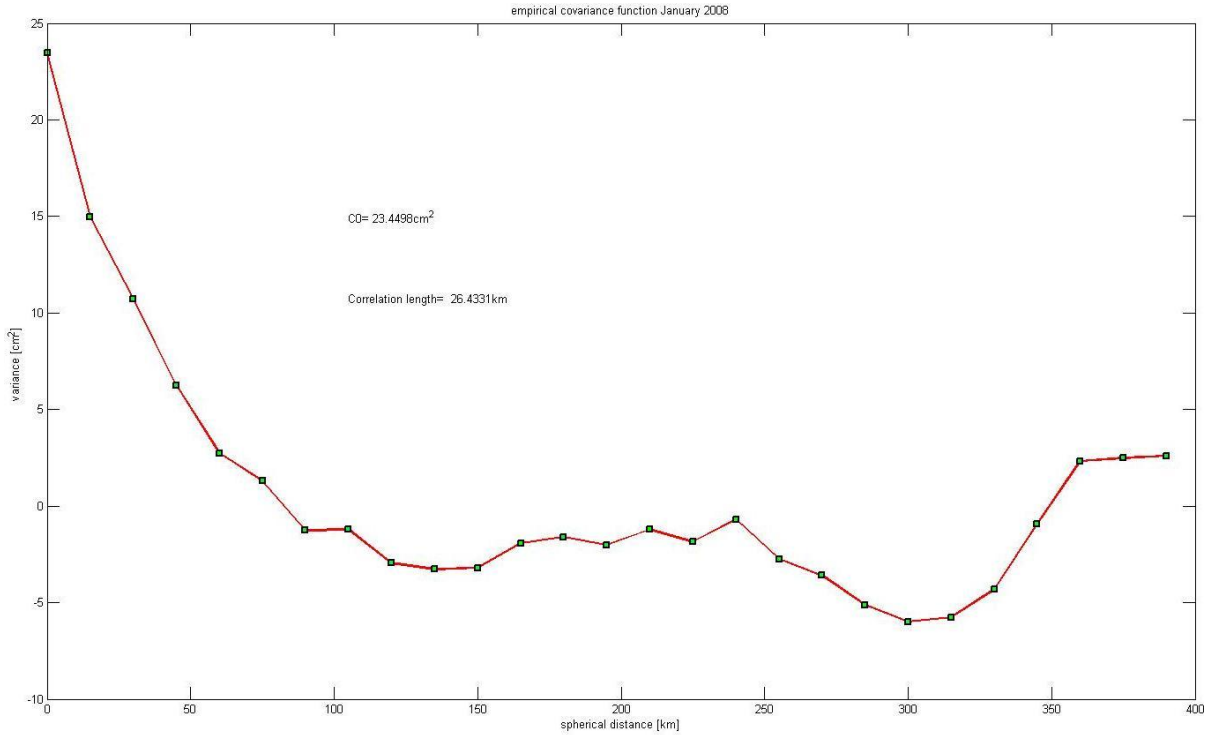
Σχήμα 4.82: Η εμπειρική ΣΣ για το Νοέμβριο 2007



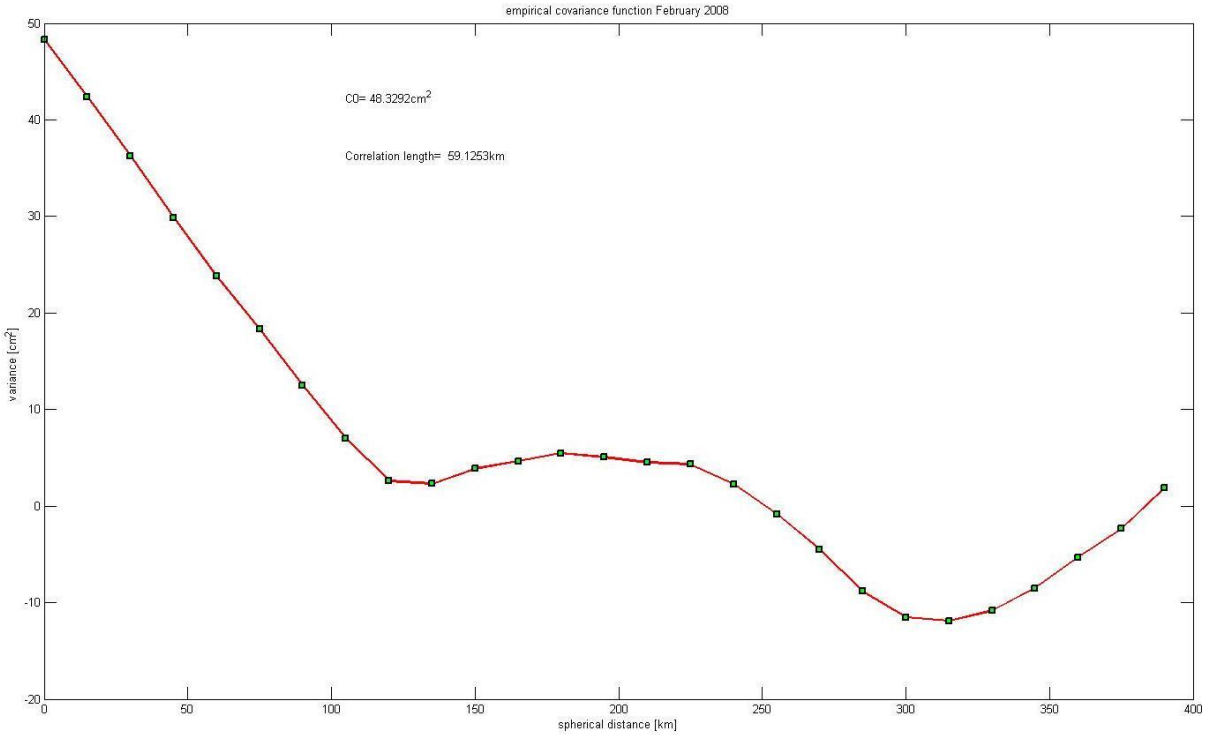
Σχήμα 4.83: Η εμπειρική ΣΣ για το Δεκέμβριο 2007

Μελετώντας τα παραπάνω σχήματα που αφορούν τις ΣΣ για το έτος 2007 προκύπτουν οι εξής ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις. Αρχικά βλέπουμε στο Σχήμα 4.79 τη μορφή της ΣΣ για τον Αύγουστο του 2007 και τις δύο μεγάλες διακυμάνσεις που εμφανίζει γύρω από το μηδέν με πολύ μεγάλο πλάτος. Η μορφή αυτή της συνάρτησης οφείλεται στις μικρές τιμές της SLA που παρατηρήθηκαν τον μήνα αυτό. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.27, οι τιμές της SLA είναι κοντά στο μηδέν με μικρό εύρος και χαμηλές ακραίες τιμές. Τέλος, ενώ η τιμή της μεταβλητότητας στο τέλος του καλοκαιριού (τον Αύγουστο) και στις αρχές του φθινοπώρου (Σεπτέμβριος) είναι μόλις 30 cm^2, φθάνει τα 70 cm^2 τον Οκτώβριο του ίδιου έτους. Το γεγονός είναι αντίθετο με τη μεταβολή της SLA κατά τη διάρκεια του έτους. Οι μεγάλες διακυμάνσεις στην τιμή της SLA σε μικρά χρονικά διαστήματα οφείλονται στην επίδραση έντονων μετεωρολογικών και κλιματικών φαινομένων. Η απότομη αύξηση της τιμής που παρατηρήθηκε αυτό το έτος οφείλεται στην επίδραση του La Niña, το οποίο θα επηρεάσει σημαντικά και τις τιμές της SLA το επόμενο έτος.

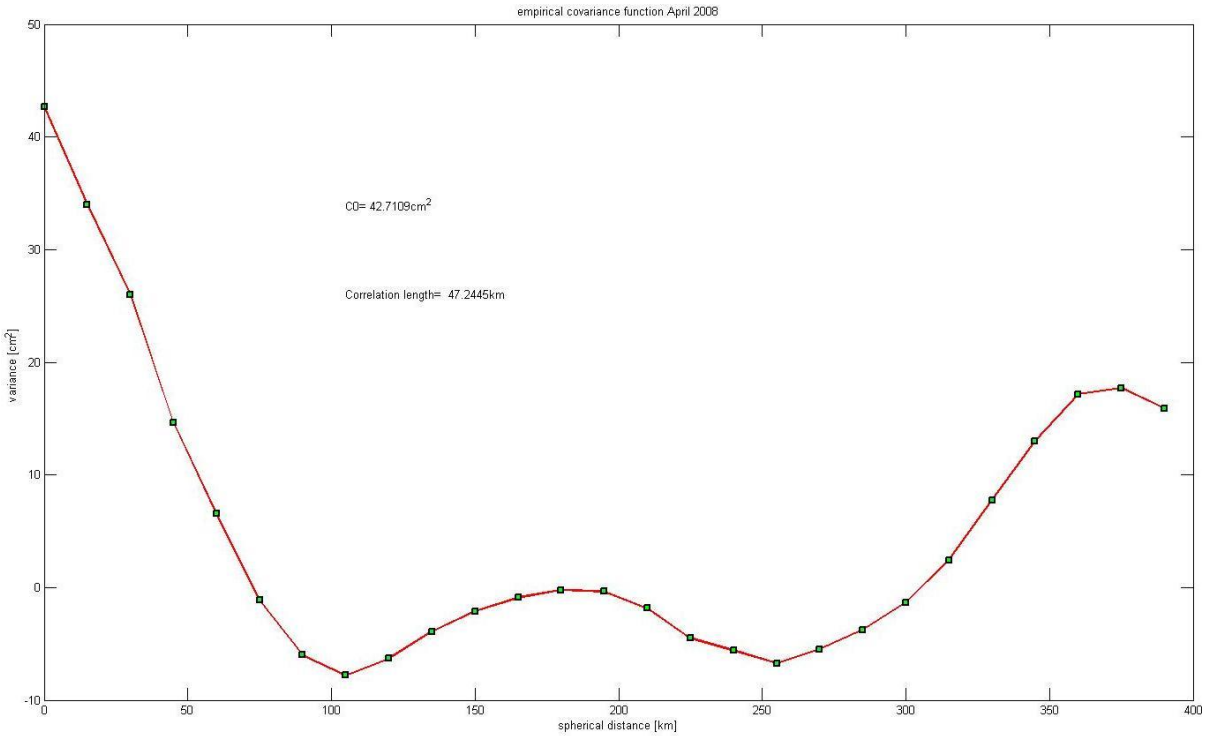
Εμπειρικές ΣΣ για το 2008



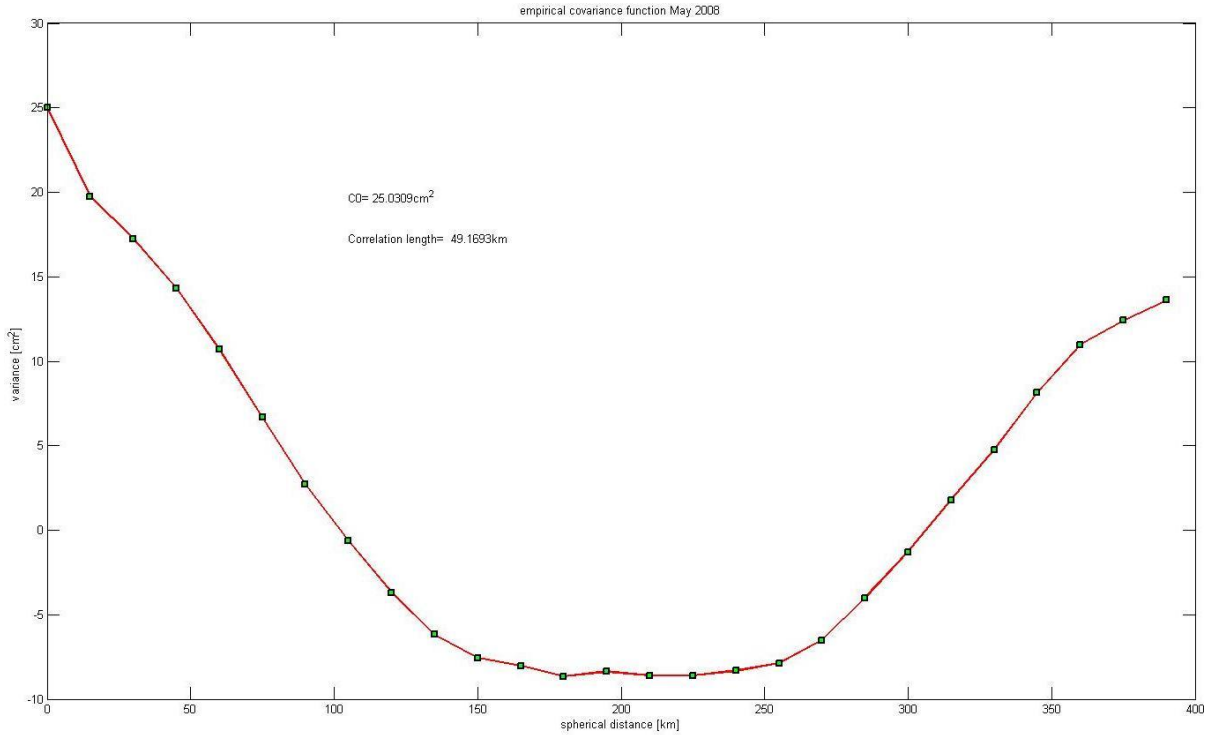
Σχήμα 4.84: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιανουάριο 2008



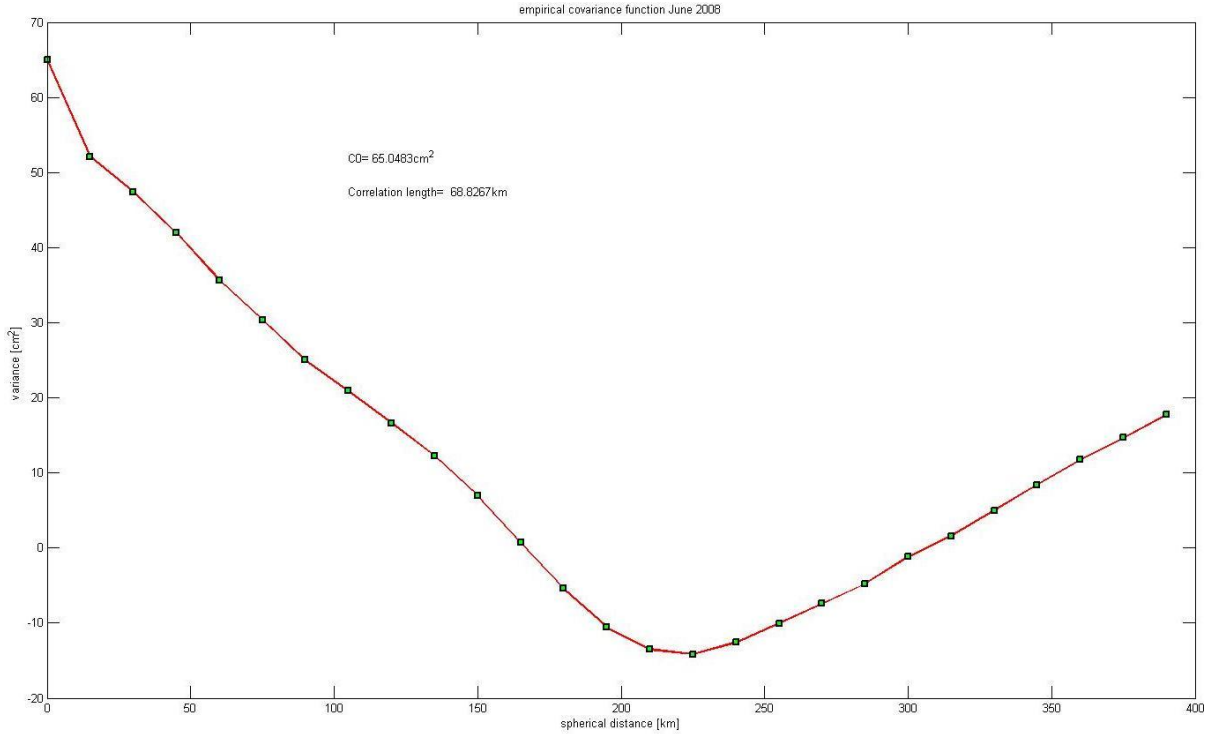
Σχήμα 4.85: Η εμπειρική ΣΣ για το Φεβρουάριο 2008



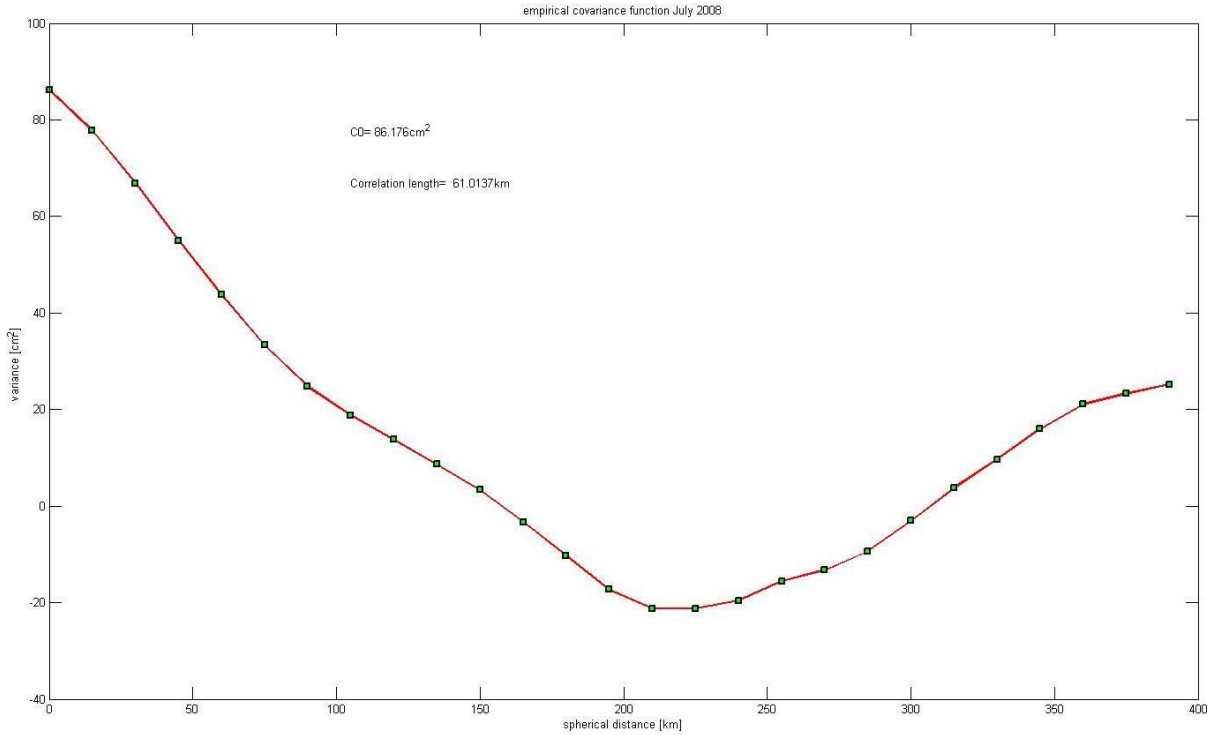
Σχήμα 4.86: Η εμπειρική ΣΣ για τον Απρίλιο 2008



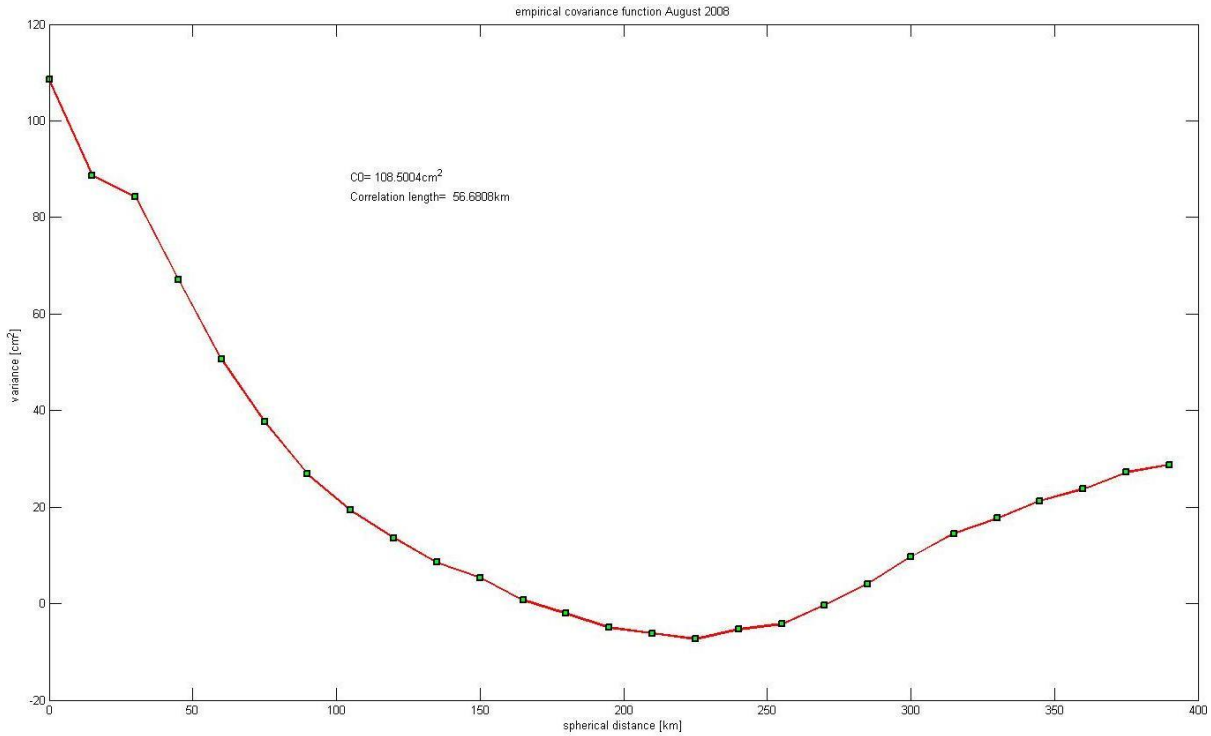
Σχήμα 4.87: Η εμπειρική ΣΣ για το Μάιο 2008



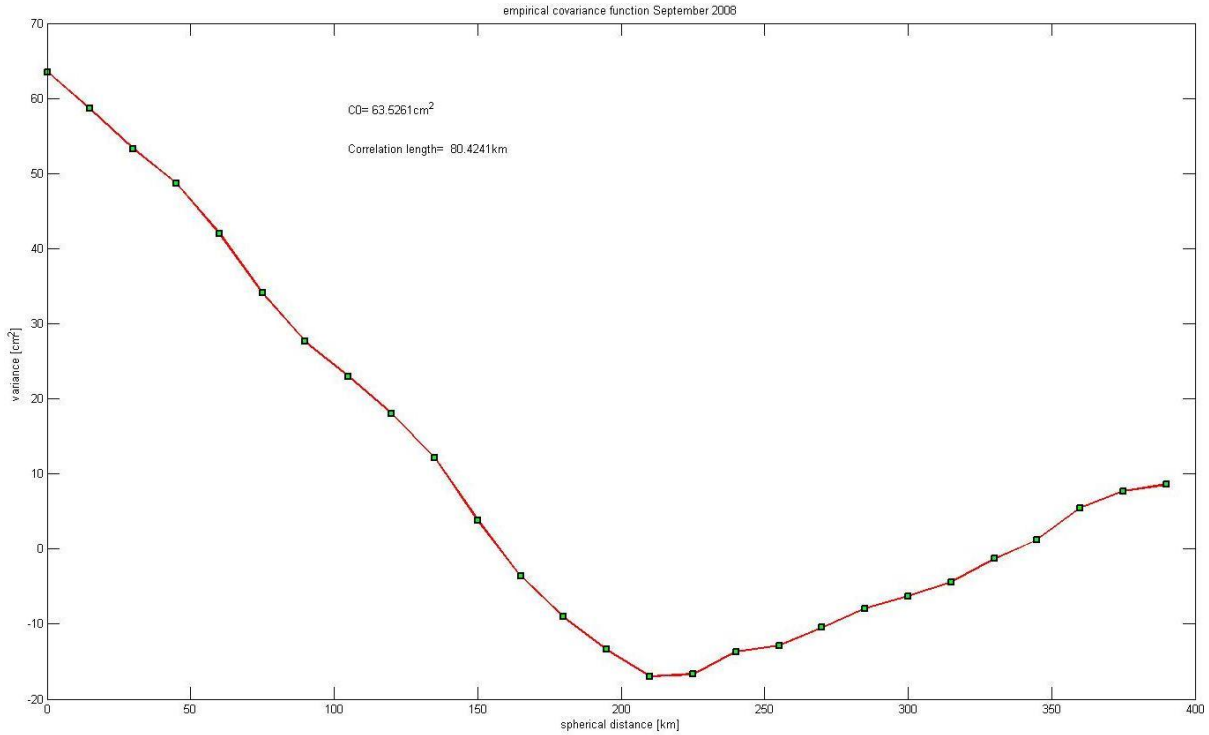
Σχήμα 4.88: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιούνιο 2008



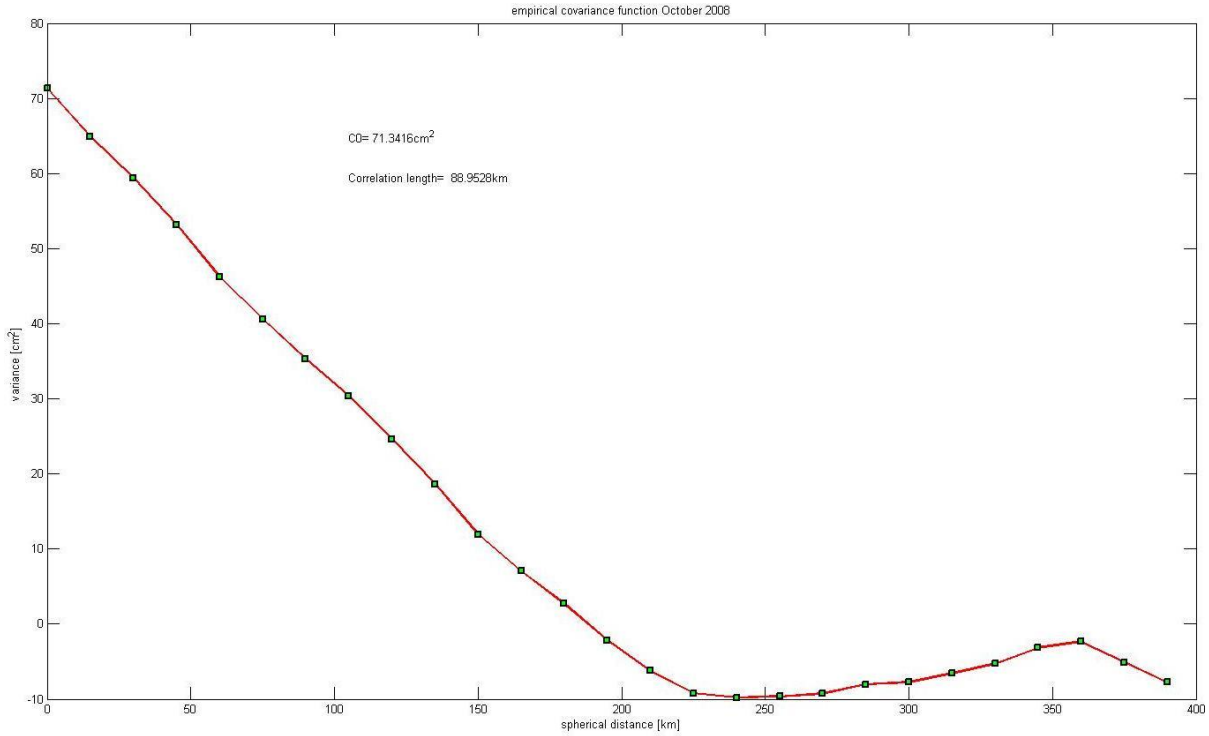
Σχήμα 4.89: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιούλιο 2008



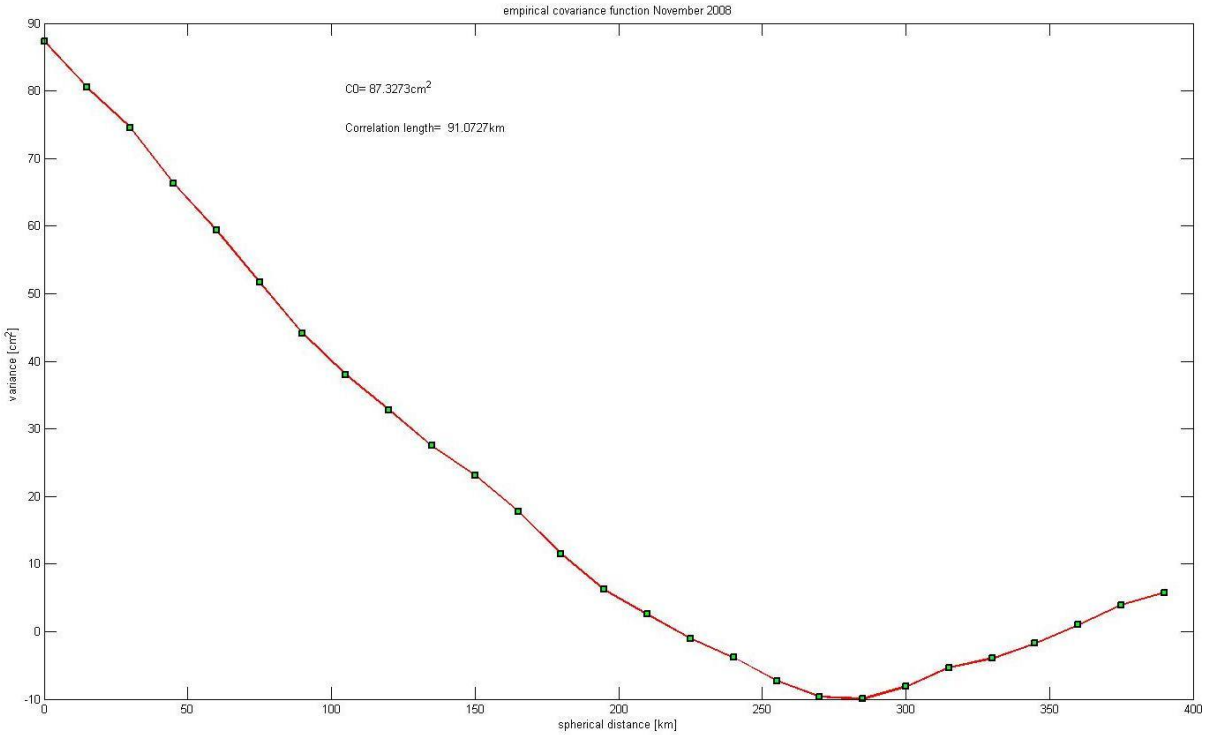
Σχήμα 4.90: Η εμπειρική ΣΣ για τον Αύγουστο 2008



Σχήμα 4.91: Η εμπειρική ΣΣ για το Σεπτέμβριο 2008

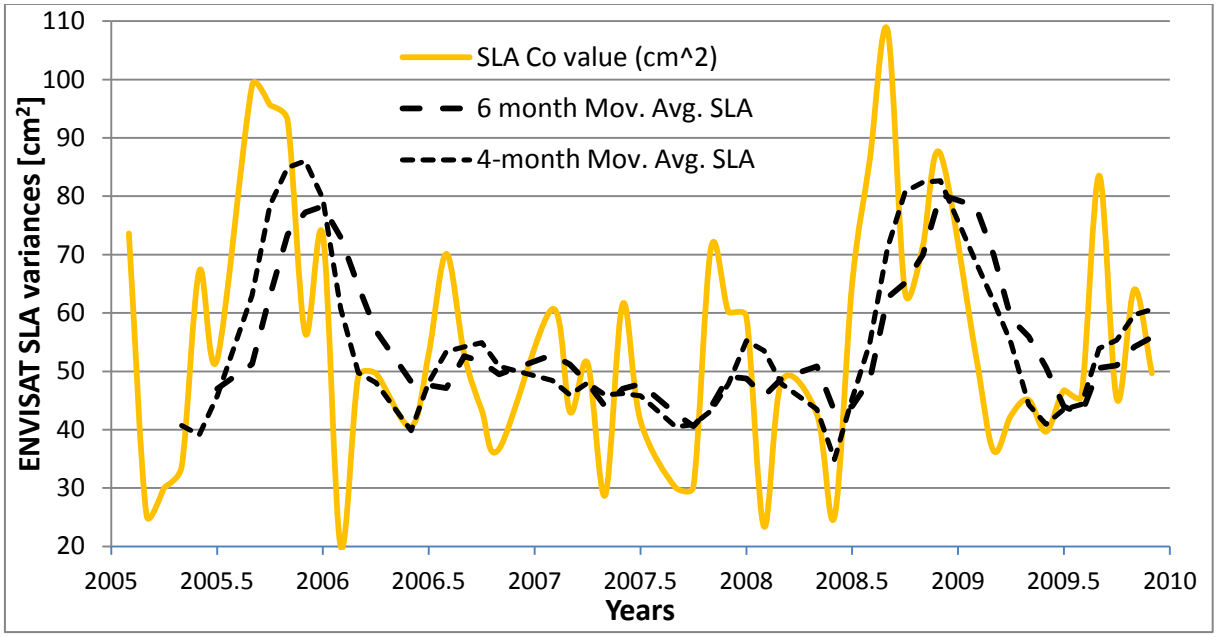


Σχήμα 4.92: Η εμπειρική ΣΣ για τον Οκτώβριο 2008



Σχήμα 4.93: Η εμπειρική ΣΣ για το Νοέμβριο 2008

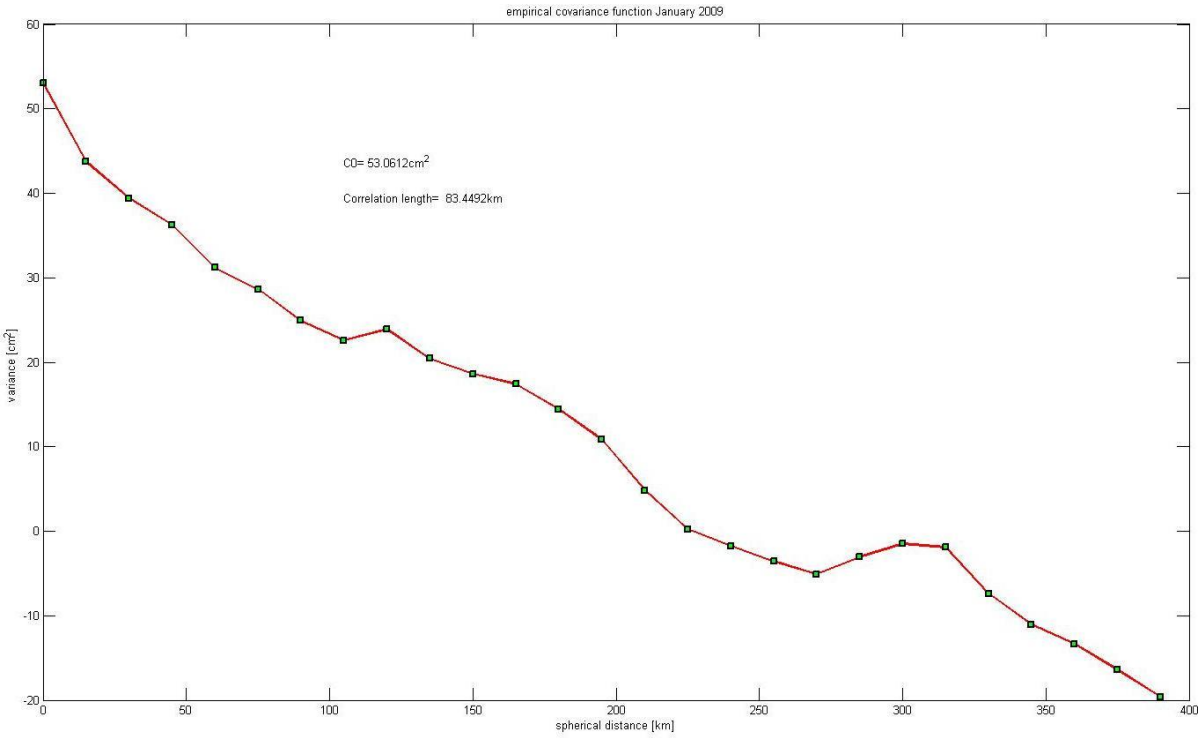
Το 2008 είναι το έτος με τις μεγαλύτερες μεταβολές της μεταβλητότητας. Η επίδραση του φαινομένου La Niña, που εμφανίστηκε στο τέλος του 2007, είναι εντονότερη. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι το 2007 παρατηρείται η μεγαλύτερη τιμής της μεταβλητότητας κατά τη διάρκεια της πενταετίας που μελετάμε (~110 cm^2) αλλά και μία από τις μικρότερες (~23 cm^2) τον Ιανουάριο (βλ. Σχήμα 4.94).



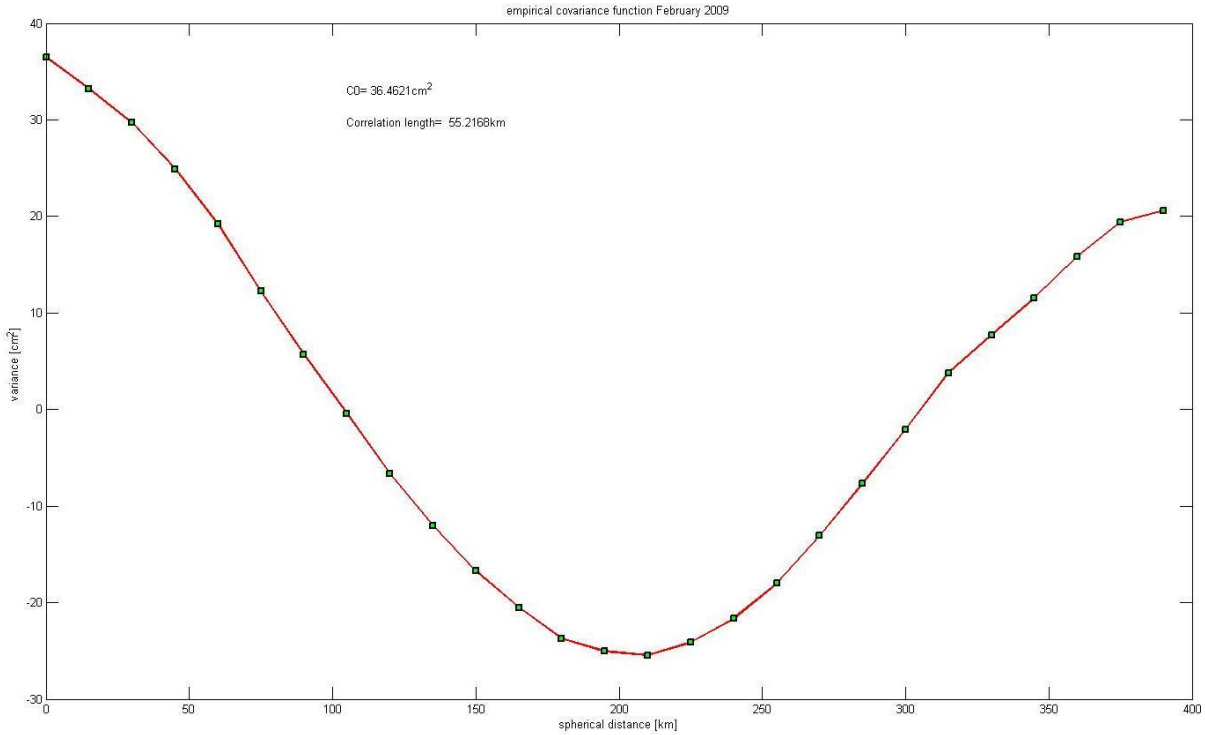
Σχήμα 4.94: Τιμές Co (cm^2)

Βέβαια, οι μεγάλες αυτές μεταβολές κατά τη διάρκεια του 2008, δεν οφείλονται μόνο στο La Niña, αλλά και στις μεγάλες τιμές που παρατηρήθηκαν για τα τοπικά και παγκόσμια κλιματικά φαινόμενα (δείκτες SOI, MOI και NAO), τα οποία όμως θα αναλυθούν σε επόμενο ενότητα του κεφαλαίου αυτού. Τέλος, η μορφή των ΣΣ ακολουθεί την μορφή των άλλων συναρτήσεων καθώς σε κανένα μήνα δεν παρατηρήθηκε ασυνέχεια δεδομένων ούτε κάποιο άλλο γεγονός που θα επηρέαζε τη μορφή των συναρτήσεων.

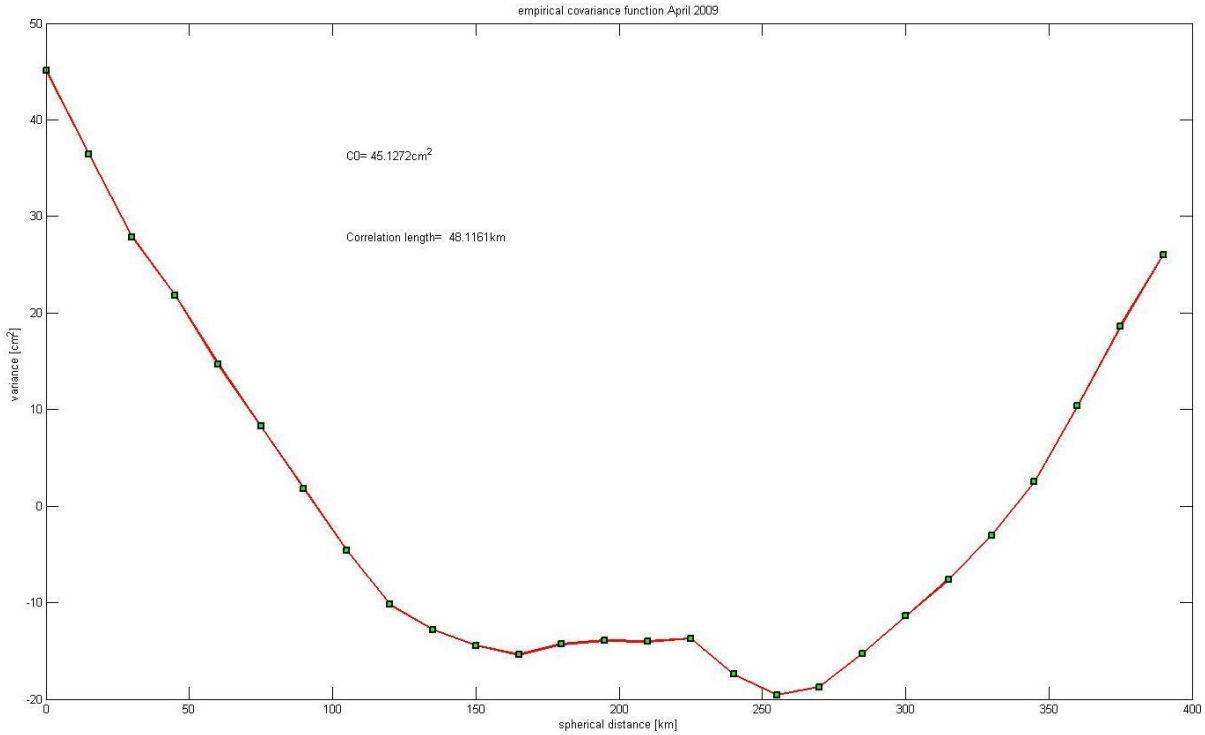
Εμπειρικές ΣΣ για το 2009



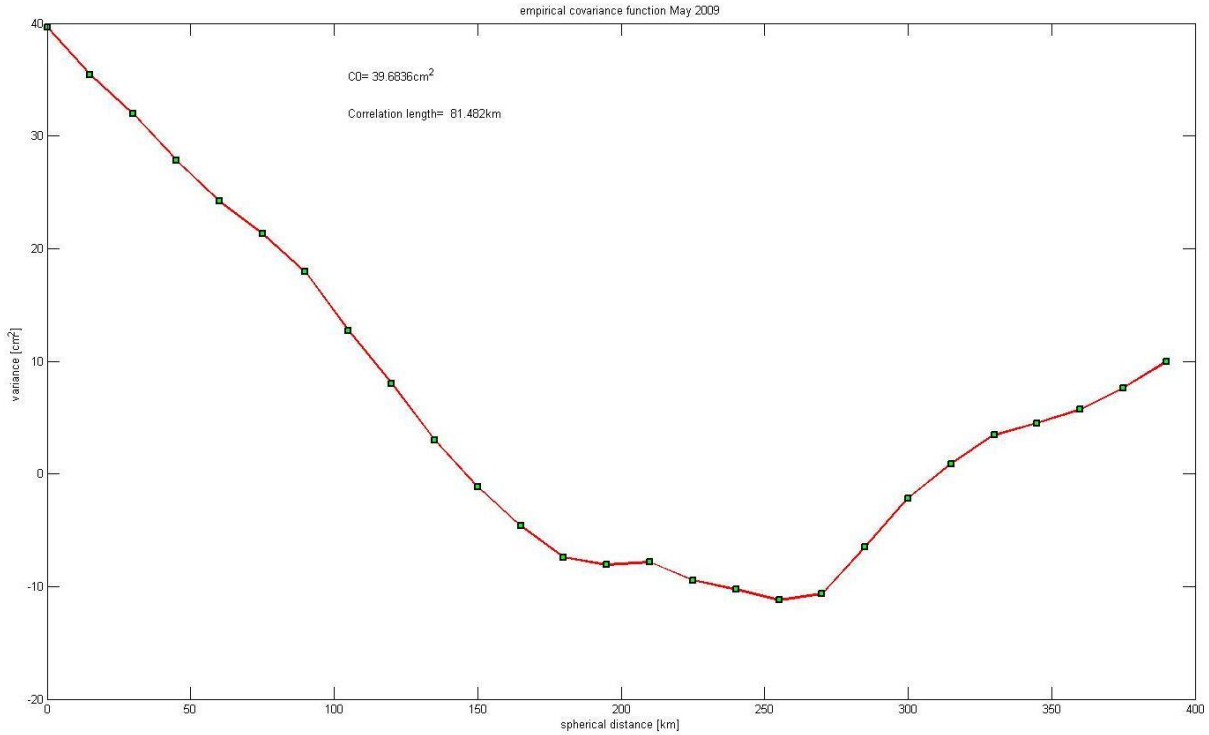
Σχήμα 4.95: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιανουάριο 2009



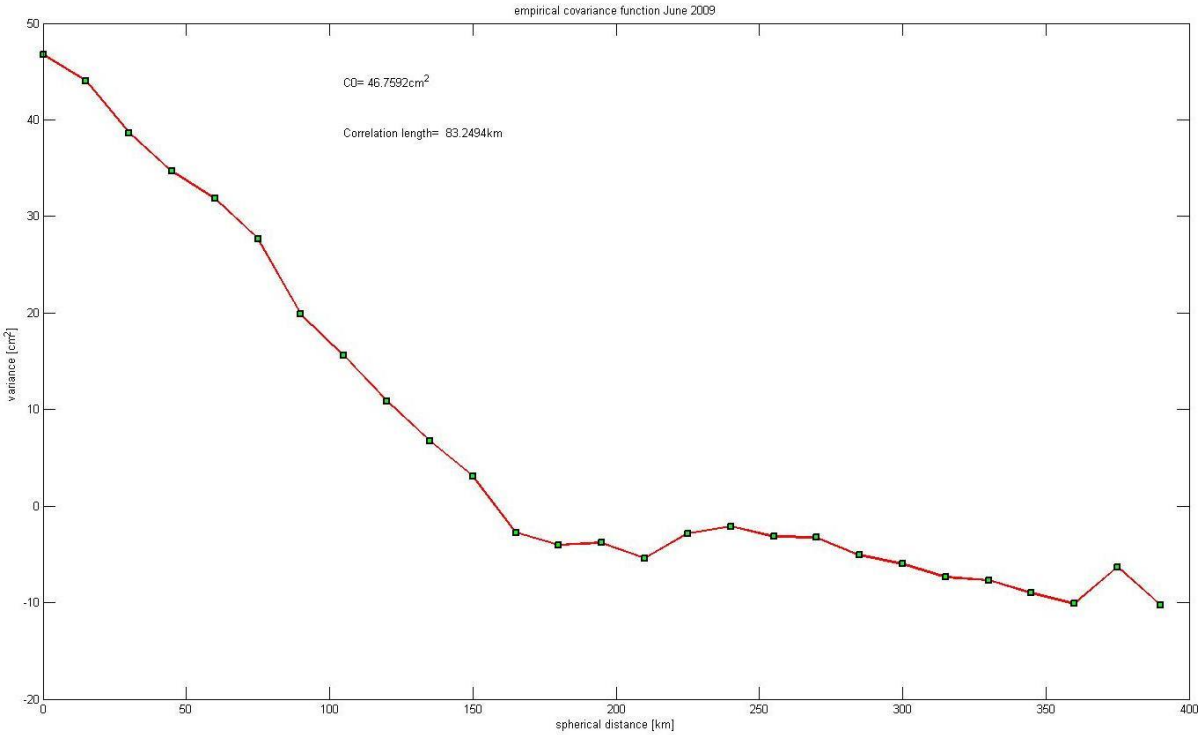
Σχήμα 4.96: Η εμπειρική ΣΣ για το Φεβρουάριο 200



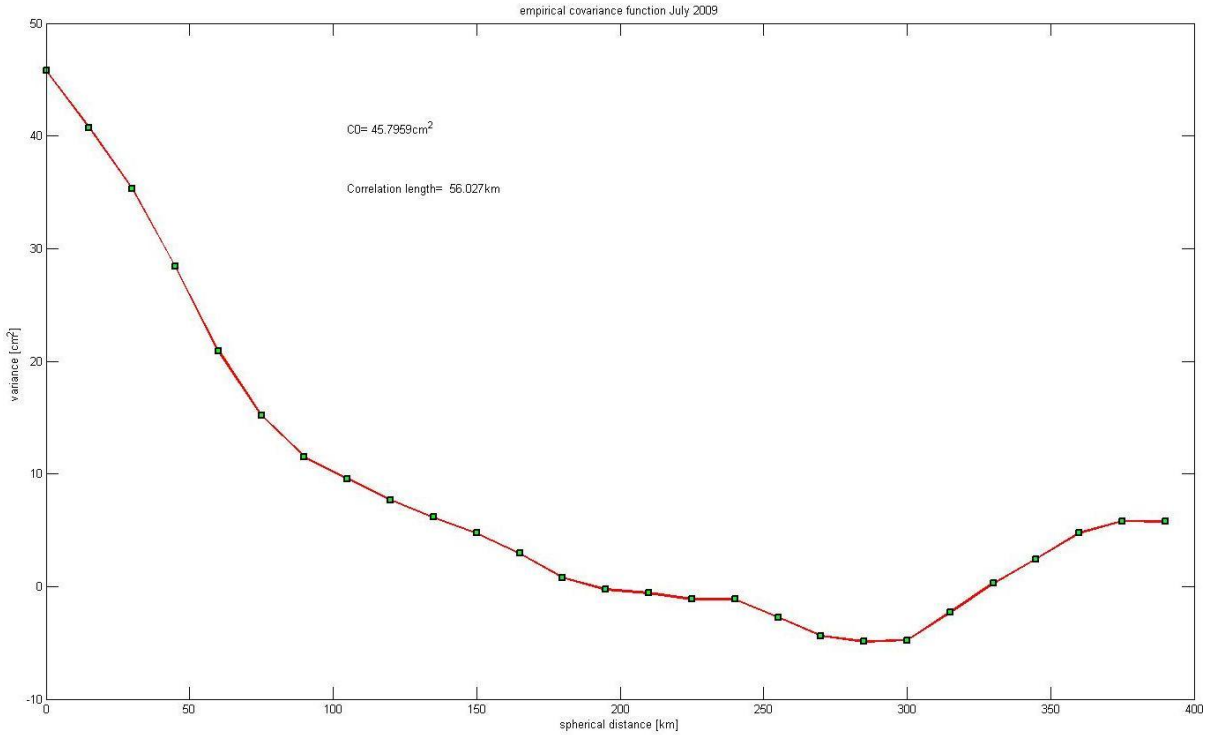
Σχήμα 4.97: Η εμπειρική ΣΣ για τον Απρίλιο 2009



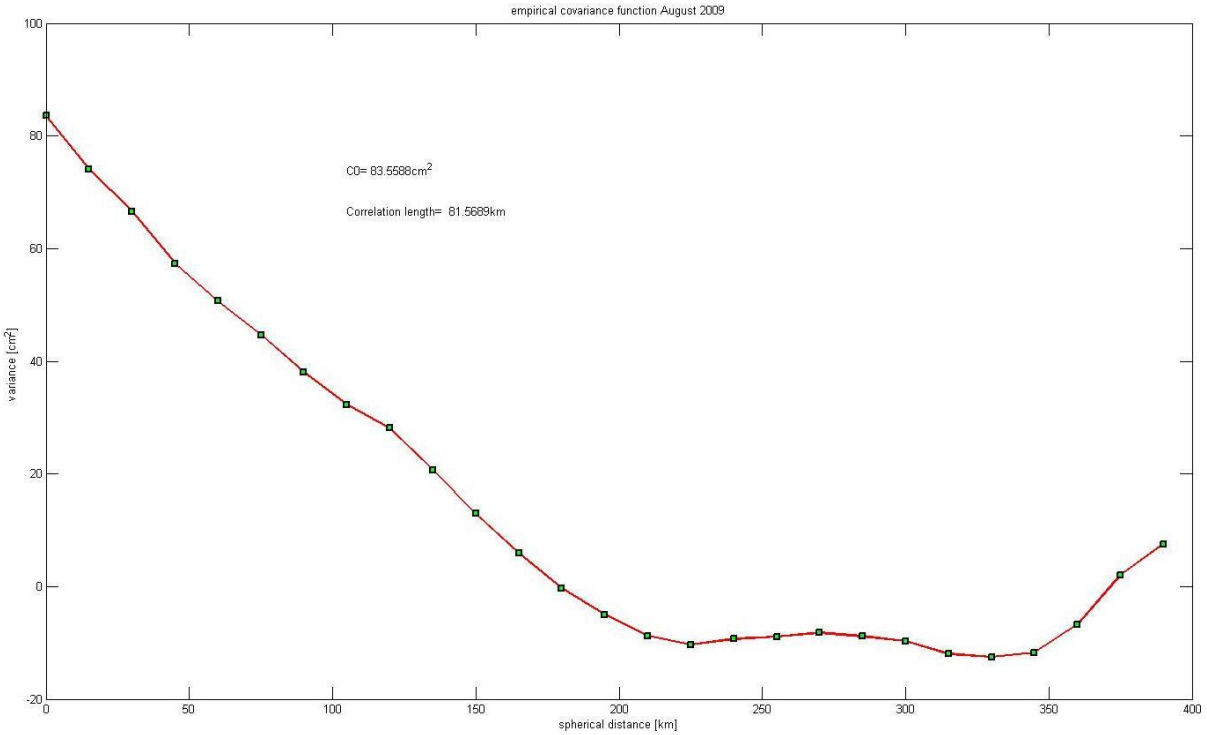
Σχήμα 4.98: Η εμπειρική ΣΣ για το Μάιο 2009



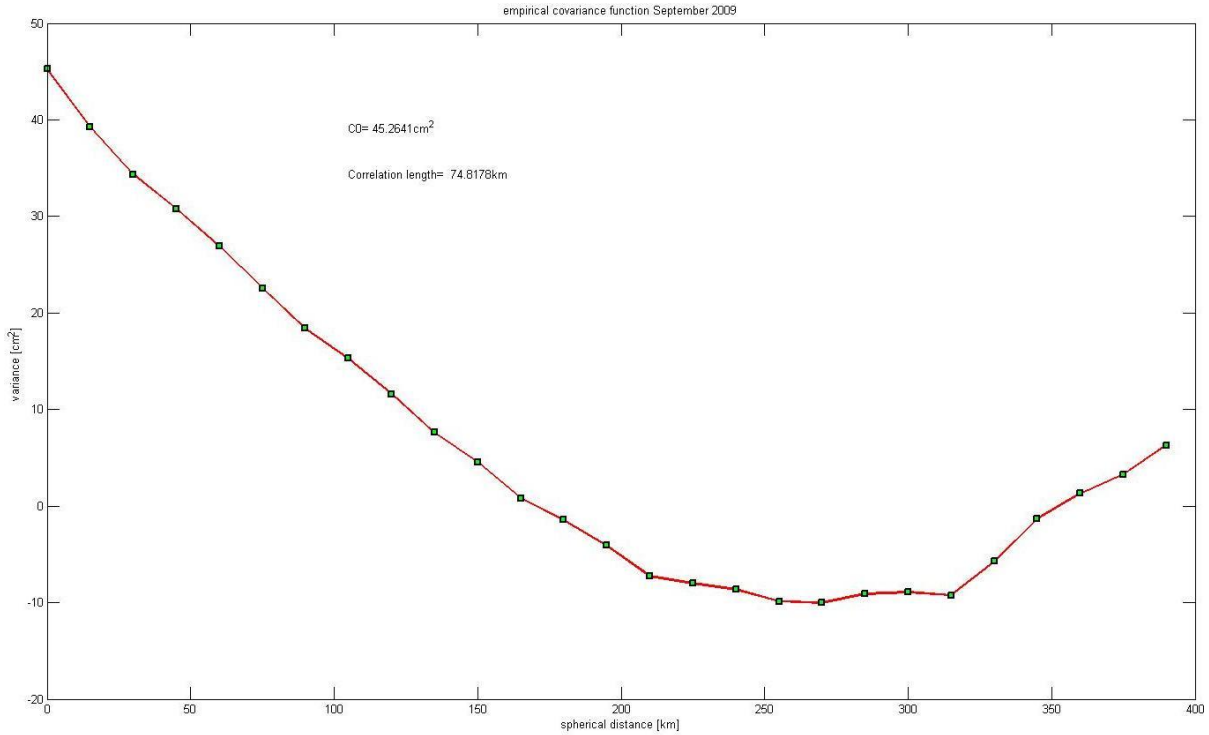
Σχήμα 4.99: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιούνιο 2009



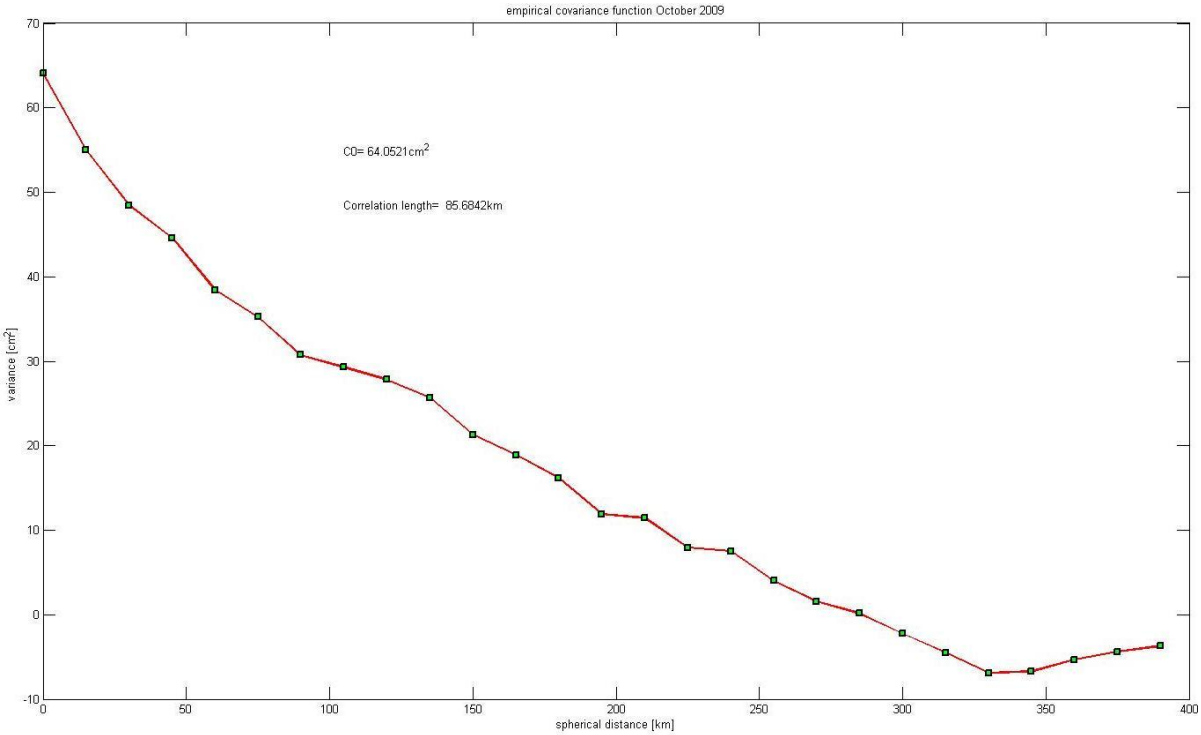
Σχήμα 4.100: Η εμπειρική ΣΣ για τον Ιούλιο 2009



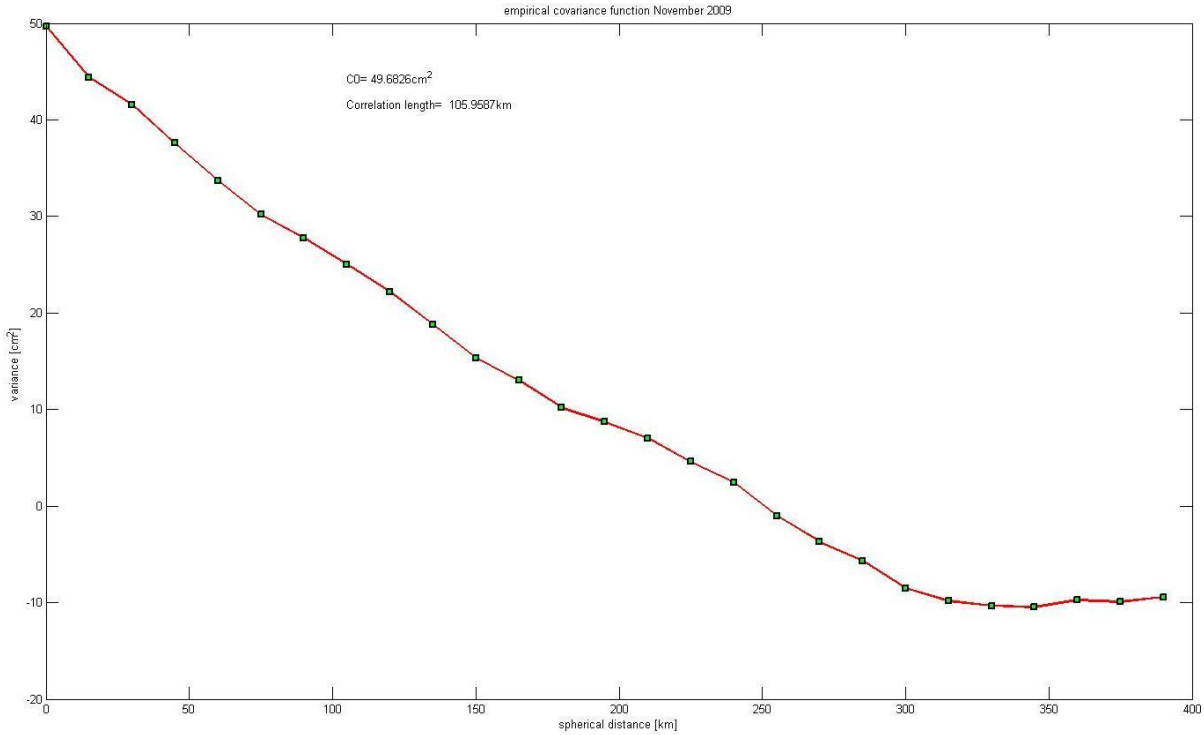
Σχήμα 4.101: Η εμπειρική ΣΣ για τον Αύγουστο 2009



Σχήμα 4.102: Η εμπειρική ΣΣ για το Σεπτέμβριο 2009

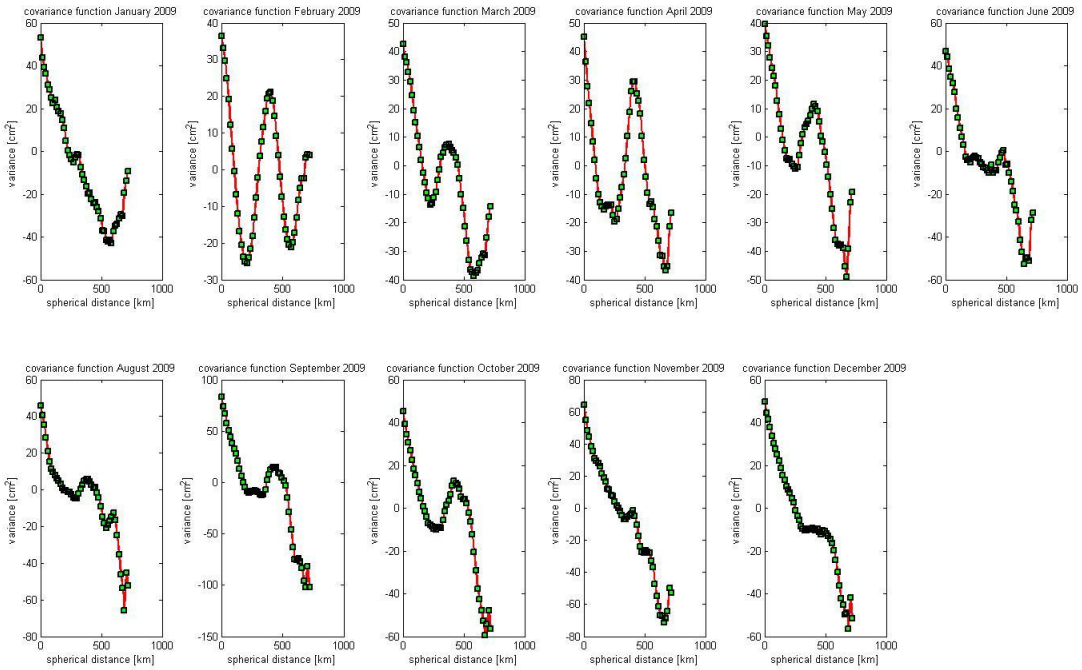


Σχήμα 4.103: Η εμπειρική ΣΣ για τον Οκτώβριο 2009



Σχήμα 4.104: Η εμπειρική ΣΣ για το Νοέμβριο 2009

Το 2009, η μεταβολή της μεταβλητότητας της SLA χαρακτηρίζεται από την εποχική και ετήσια μεταβολή που παρατηρήθηκε γενικότερα αυτά τα χρόνια, με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται τους καλοκαιρινούς μήνες και τις χαμηλότερες μετά τα μέσα του φθινοπώρου. Το μήκος συσχέτισης είναι γενικά ανάλογο της μεταβλητότητας στις περιπτώσεις που η ΣΣ έχει την τυπική της μορφή. Η μορφή αυτή εμφανίζεται στην πλειοψηφία των σχημάτων, με τις ορισμένες εξαιρέσεις οφείλονται κυρίως στην έλλειψη ικανοποιητικού αριθμού δεδομένων ή πολύ μεγάλου εύρους τιμών. Η μελέτη των σχημάτων για μεγαλύτερο μήκος δεν θα έδινε αποδεκτές τιμές, όπως έχουμε αναφέρει προηγουμένως, και είναι χαρακτηριστική η μορφή των ΣΣ του έτους 2009 που παρατίθεται στο επόμενο Σχήμα, όπου οι ΣΣ υπολογίστηκαν για μήκος άνω των 700-800 km (Σχήμα 4.105). Σε όλους τους μήνες μετά τα 400-500 km εμφανίζονται μέγιστες και ελάχιστες τιμές οι οποίες δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

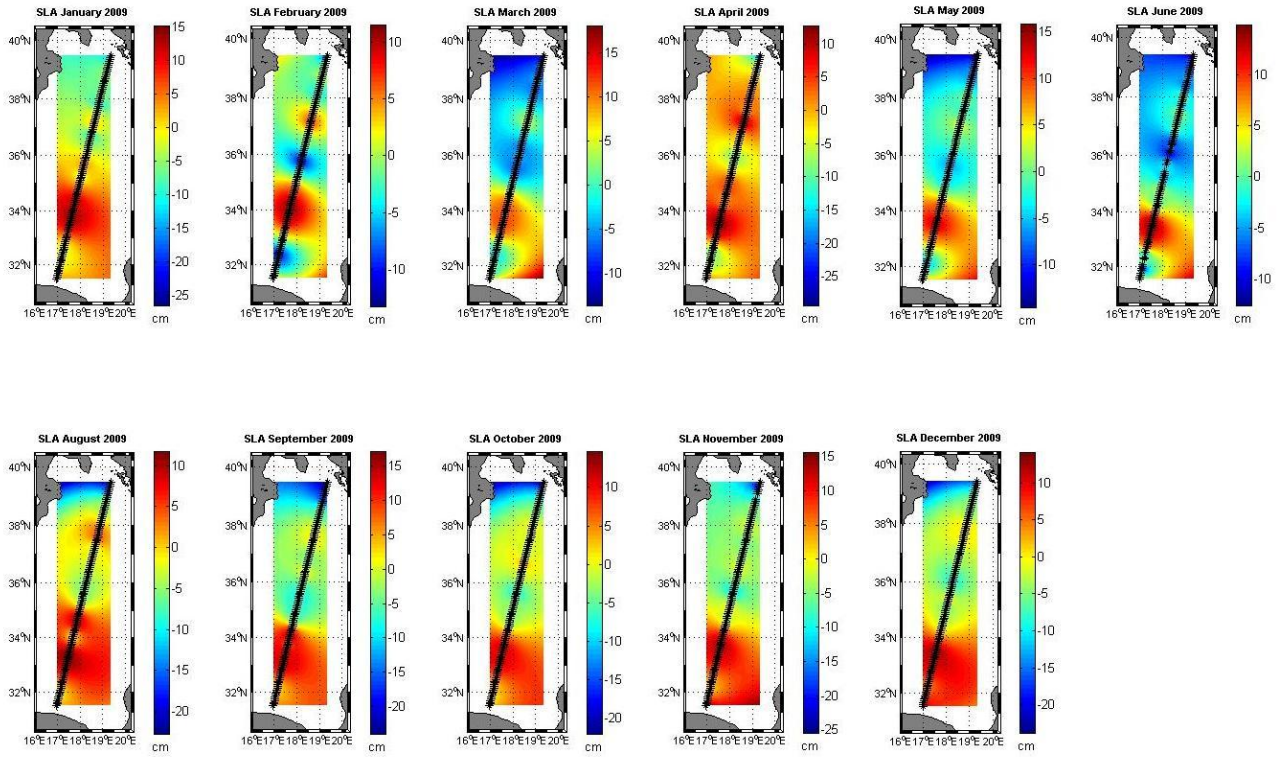


Σχήμα 4.105: Εμπειρικές ΣΣ για το 2009

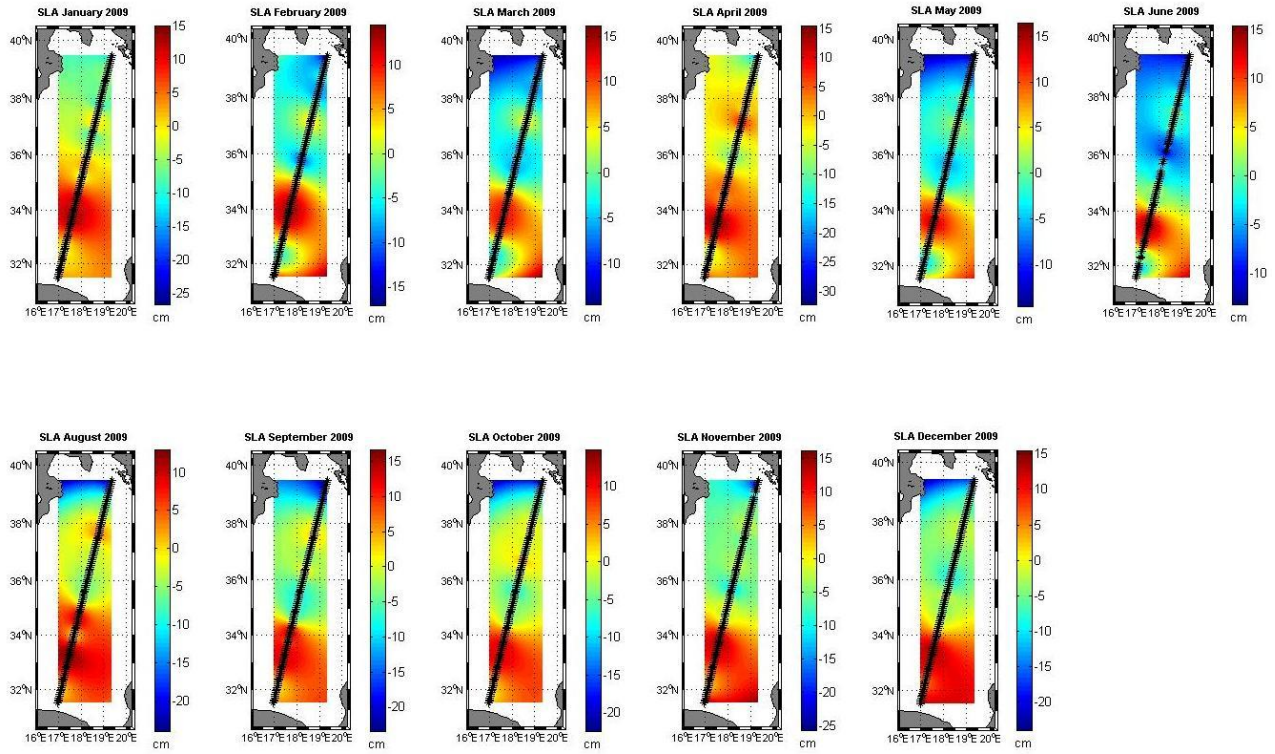
Επομένως, ο υπολογισμός μιας ΣΣ είναι μια διαδικασία στην οποία η επιλογή συγκεκριμένων κριτηρίων (βήμα κλάσεων, μήκος σχεδίασης) διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο και πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή. Γενικά, οι ΣΣ πρέπει να εμφανίζουν τη μέγιστη τιμή στην αρχή, να μειώνονται σταδιακά και να τέλος να «ταλαντώνονται» γύρω από το μηδέν. Συναρτήσεις που δεν εμφανίζουν αυτή τη μορφή, προκύπτουν από την επιλογή τιμών παραμέτρων που δεν ικανοποιούν συγκεκριμένα κριτήρια είτε από προβληματικά δεδομένα.

4.4 Εμπειρική συνάρτηση συμμεταβλητότητας μετά την εφαρμογή της αντίστροφης βαρομετρικής διόρθωσης

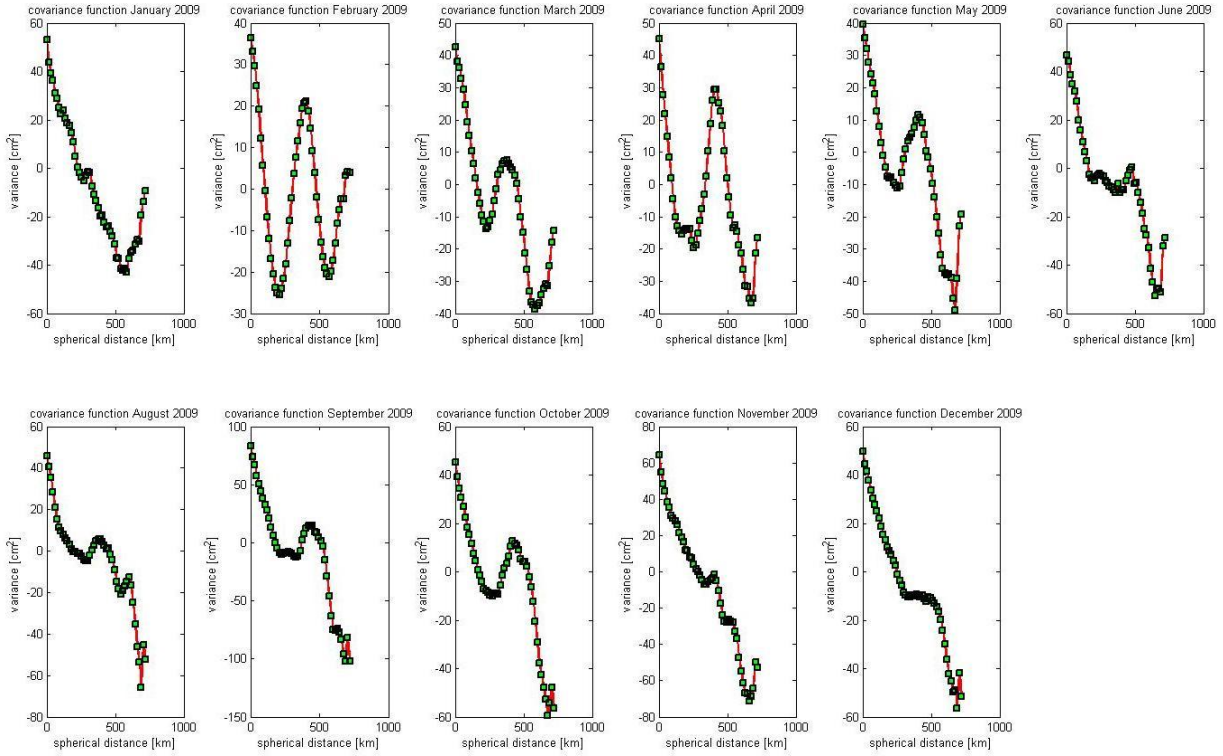
Η τιμή της SLA επηρεάζεται από τις τιμές της ατμοσφαιρικής πίεσης και η αφαίρεση της επίδρασης από τα πρωτογενή δεδομένα γίνεται με την εφαρμογή της αντίστροφης βαρομετρικής διόρθωσης. Άλλωστε, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχέση μεταξύ βαρομετρικών χαμηλών και τιμών της SLA, δηλαδή κατά πόσο μπορεί να επηρεάσει η παρουσία ενός βαρομετρικού χαμηλού τις τιμές της SLA στην ευρύτερη περιοχή (Ματσιόπουλος 2010). Στην παρούσα έρευνα εξετάστηκαν τιμές της SLA από τις οποίες δεν έχει αφαιρεθεί η τιμής της αντίστροφης βαρομετρικής διόρθωσης. Ωστόσο, μελετήθηκε κατά πόσο η εφαρμογή της διόρθωσης επηρεάζει τη ΣΣ. Ειδικότερα, για το 2009, υπολογίστηκαν οι τιμές της SLA και οι αντίστοιχες ΣΣ πριν και μετά την εφαρμογή της διόρθωσης για όλους τους μήνες (Σχήματα 4.106-4.109).



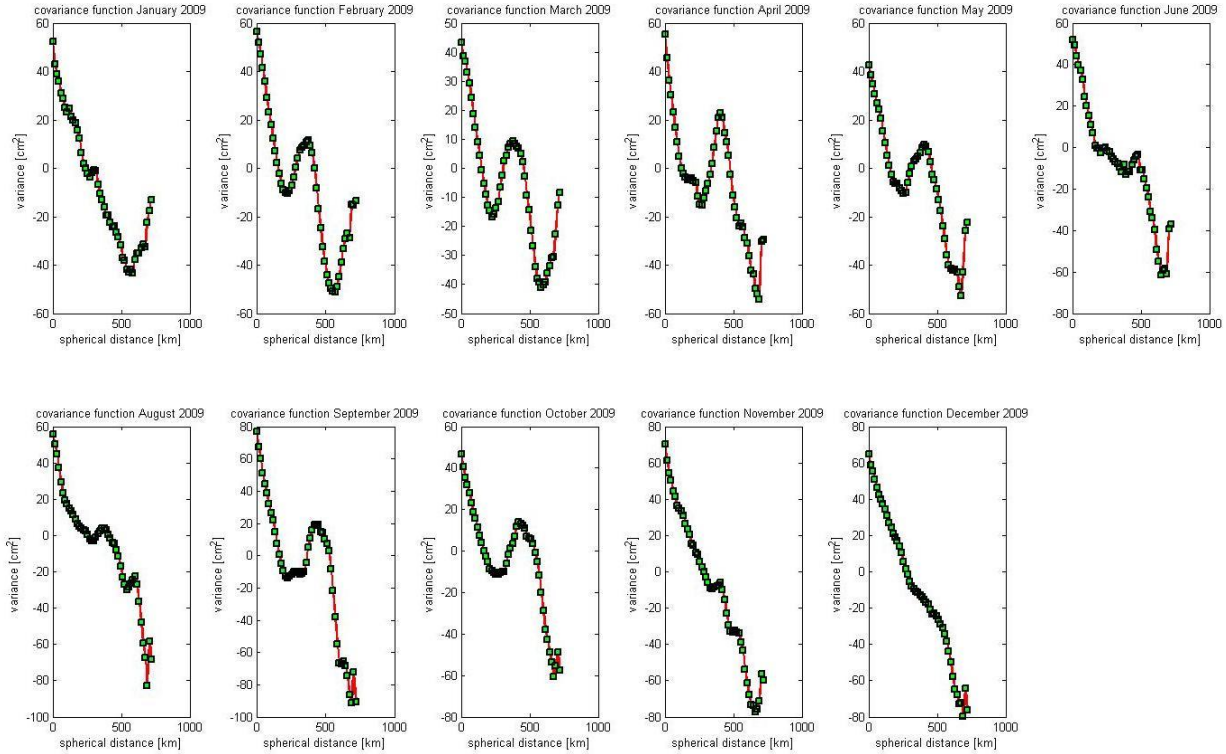
Σχήμα 4.106: Τιμές SLA (cm) πριν την εφαρμογή της αντίστροφης βαρομετρικής διόρθωσης



Σχήμα 4.107: Τιμές SLA (cm) μετά την εφαρμογή της αντίστροφης βαρομετρικής διόρθωσης



Σχήμα 4.108: Τιμές εμπειρικής ΣΣ πριν την εφαρμογή της αντίστροφης βαρομετρικής διόρθωσης

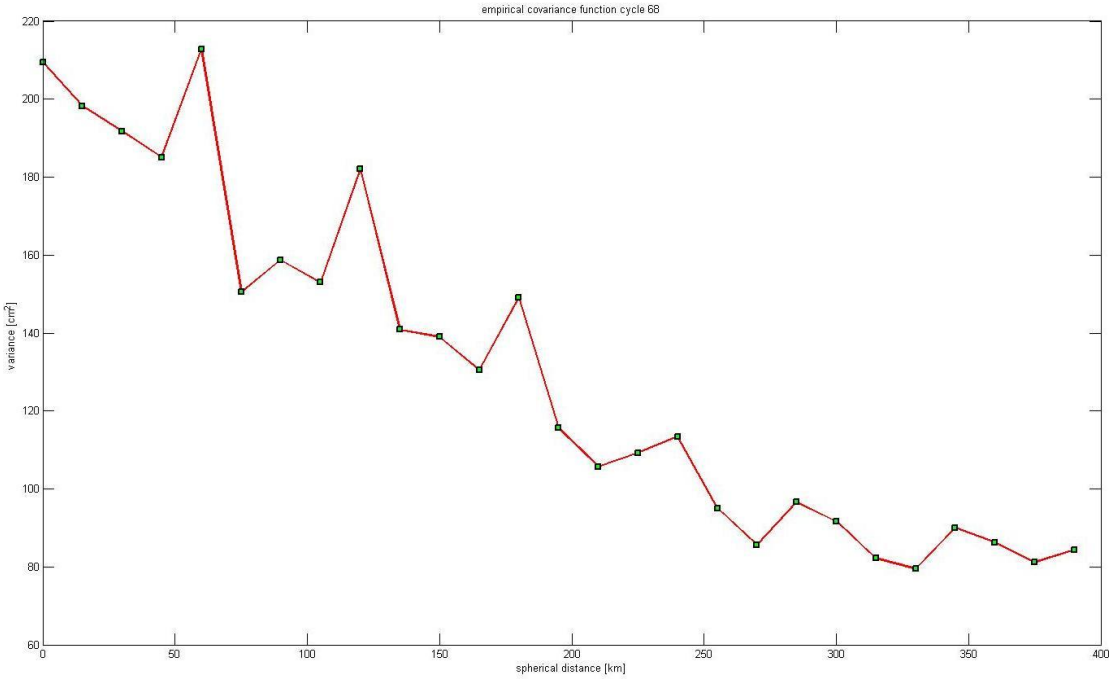


Σχήμα 4.109: Τιμές εμπειρικής ΣΣ μετά την εφαρμογή της αντίστροφης βαρομετρικής διόρθωσης

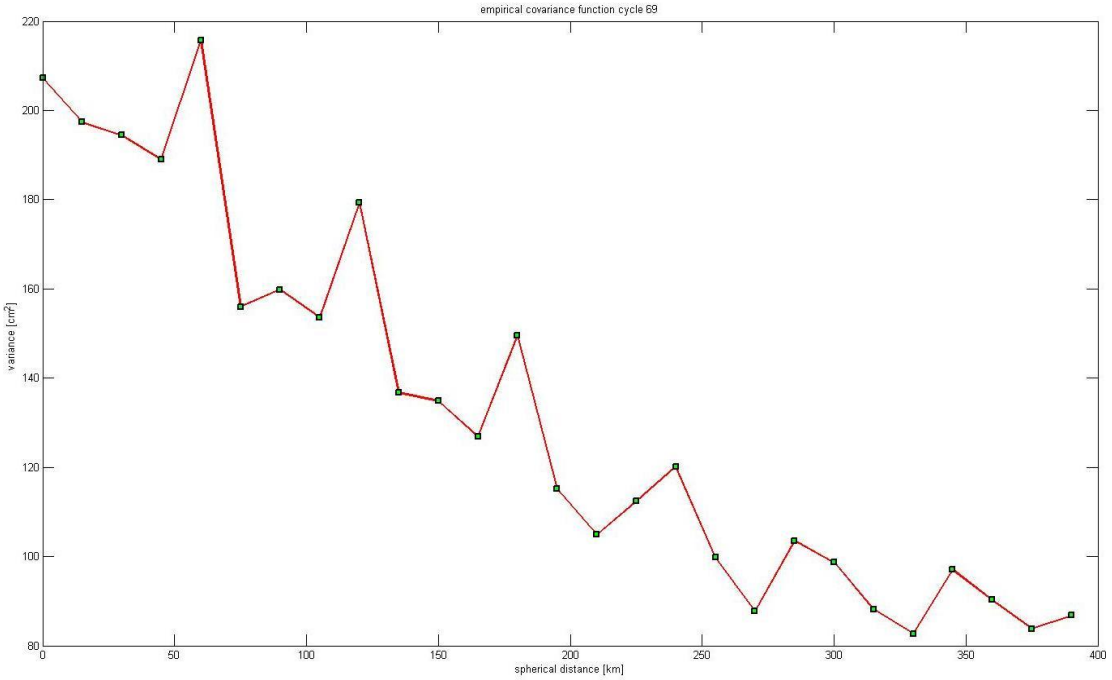
Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω σχήματα, η εφαρμογή της αντίστροφης βαρομετρικής διόρθωσης επηρεάζει αρκετά την τιμή της SLA (~5-10 cm) στις περισσότερες περιπτώσεις. Η μορφή της ΣΣ ωστόσο ελάχιστα επηρεάζεται, όπως επίσης οι τιμές των μεταβλητοτήτων αφού κατά μήκος της διάβασης δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στην τιμή της διόρθωσης. Συμπερασματικά, καθώς στην παρούσα μελέτη αυτό που μας απασχόλησε κυρίως ήταν η μορφή των ΣΣ και όχι το μέγεθος των τιμών της, επιλέξαμε να μελετήσουμε τις πρωτογενείς τιμές της SLA στις οποίες έχουν εφαρμοστεί όλες οι διορθώσεις εκτός της αντίστροφης βαρομετρικής.

4.5 Εμπειρικές συναρτήσεις cross track

Όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενο κεφάλαιο, όσον αφορά τις εμπειρικές συναρτήσεις cross track εξετάστηκαν δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη υπολογίστηκαν εμπειρικές ΣΣ για το σύνολο των περασμάτων ενός ολόκληρου έτους, του 2008, (κύκλοι 65-74) και στη δεύτερη υπολογίστηκε ΣΣ σε ένα παράθυρο δεδομένων έξι διαδοχικών κύκλων. Αρχικά, θα παρουσιαστούν οι ΣΣ που δημιουργήθηκαν για το έτος 2008. Ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με αυτή των συναρτήσεων along track. Επιλέχθηκε αρχικά το ίδιο βήμα κλάσεων των 15 km ωστόσο ανωμαλίες στη μορφή των ΣΣ (Σχήμα 4.110 και 4.111) μας οδήγησαν στην επιλογή μεγαλύτερου βήματος και μεγαλύτερου μήκους απεικόνισης αφού υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα σε όλο το εύρος της Μεσογείου. Είναι χαρακτηριστικό πως η μέση τιμή όλων των αποστάσεων που υπολογίστηκαν ήταν ~800 km. Οπότε η επιλογή ενός τόσου μικρού βήματος σε συνδυασμό με το μικρό μέγιστο μήκος απεικόνισης, καθιστούσαν τη ΣΣ εξαρχής προβληματική.



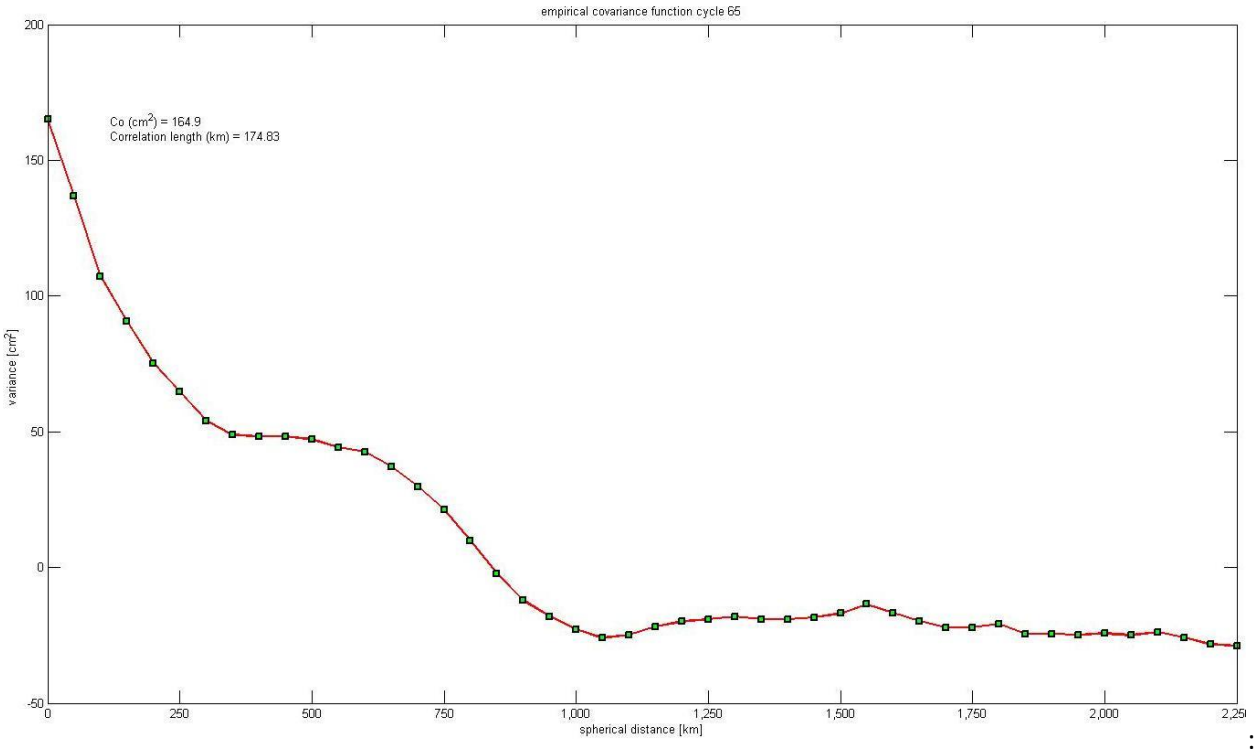
Σχήμα 4.110: Τιμές εμπειρικής ΣΣ για τον κύκλο 68 βήμα 15 km



Σχήμα 4.111: Τιμές εμπειρικής ΣΣ για τον κύκλο 69 βήμα 15 km

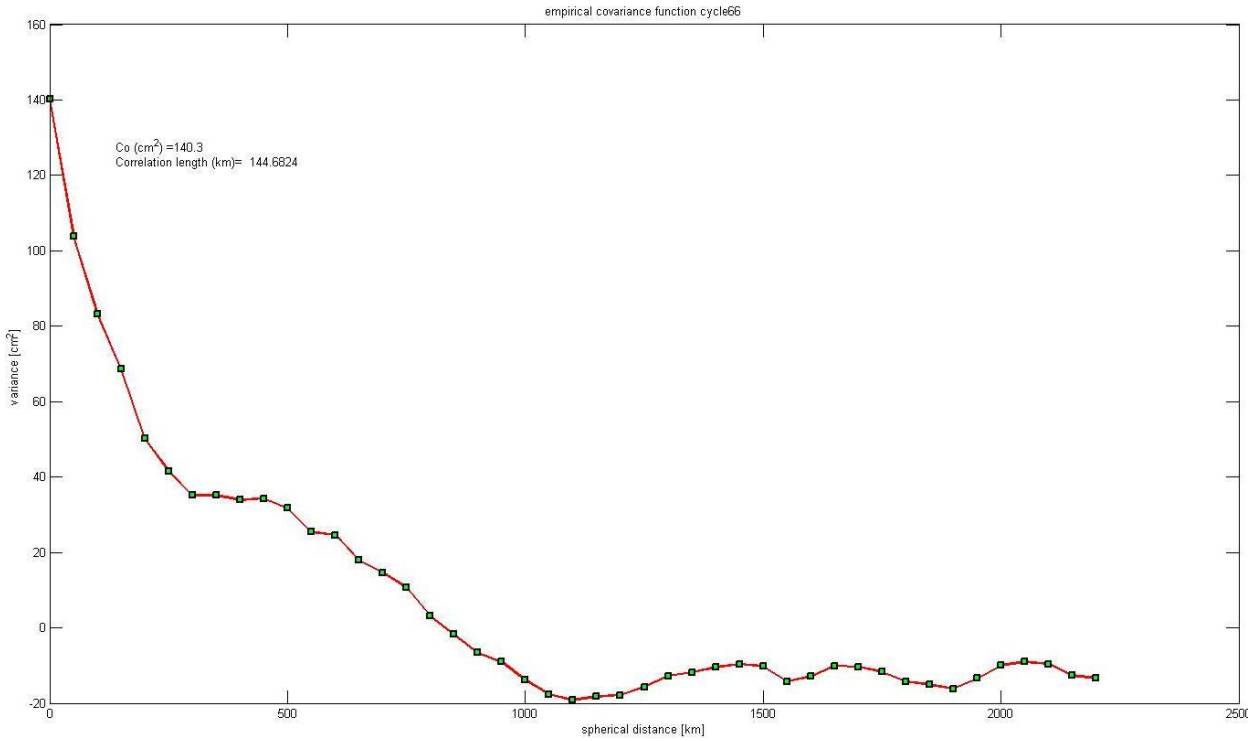
Για την επιλογή του κατάλληλου βήματος, έγιναν διάφορες δοκιμές. Εξετάστηκαν οι τιμές των 40, 50 και 60 km για την επιλογή του βήματος. Καταλήξαμε σε αυτή των 50 km. Επόμενη παράμετρος που εξετάστηκε ήταν αυτή του μέγιστου μήκους υπολογισμού προκειμένου να μην εμφανίζονται διαταραχές

και σφάλματα στον υπολογισμό των ΣΣ για μεγάλες σφαιρικές αποστάσεις. Επιλέχτηκε αυτό των 2250 km, καθώς σε αυτό το μήκος η ΣΣ μεταβάλλεται γύρω από το μηδέν. Βέβαια, για το μήκος απεικόνισης θα μπορούσε να επιλεγεί μικρότερη τιμή καθώς η ΣΣ έπειτα από ένα συγκεκριμένο μήκος (1500 km) δεν παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις. Στα σχήματα που ακολουθούν θα παρουσιαστεί η τελική μορφή των ΣΣ που υπολογίστηκαν για όλους τους κύκλους του έτους 2008.

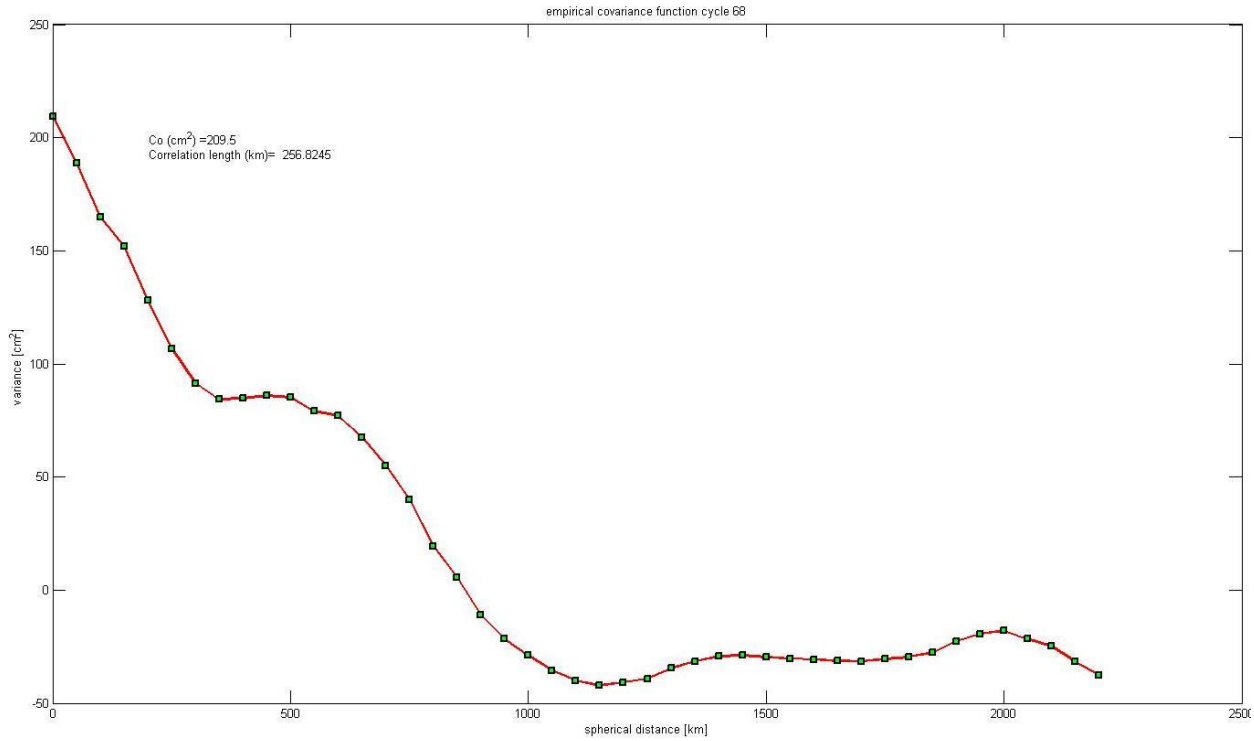


:

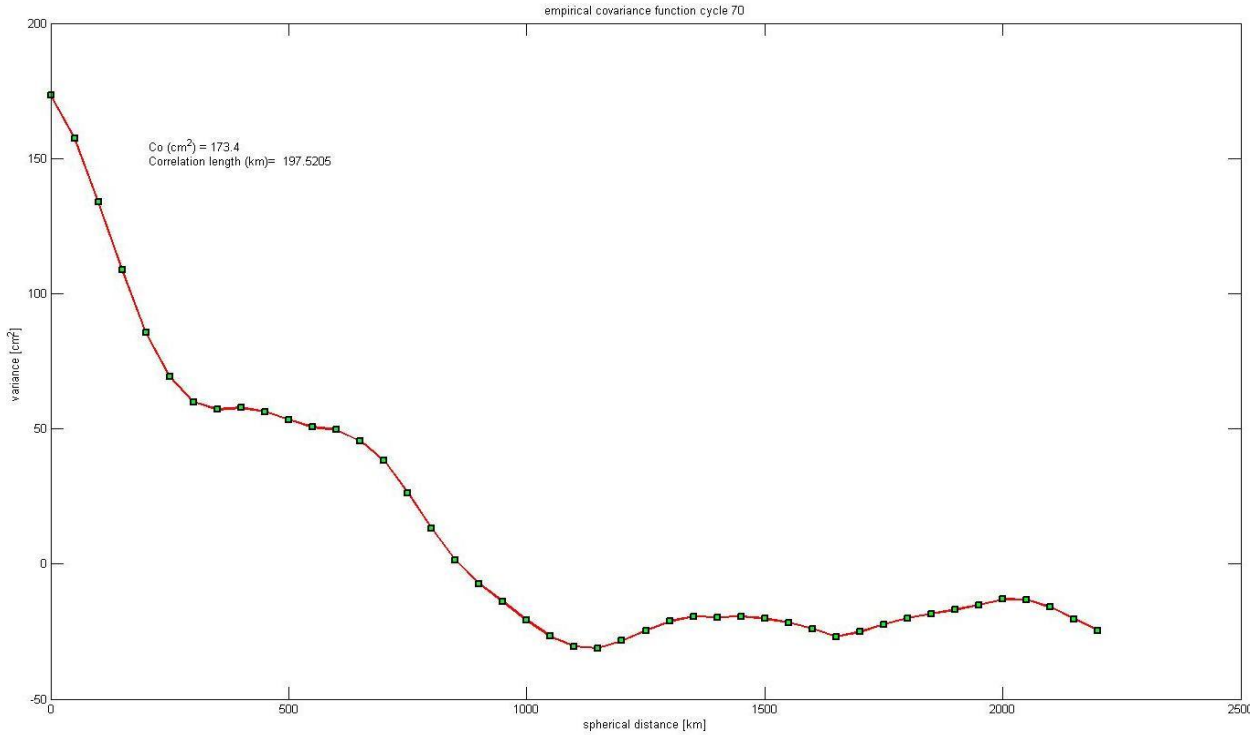
Σχήμα 4.112:Τιμές εμπειρικής ΣΣ για τον κύκλο 65



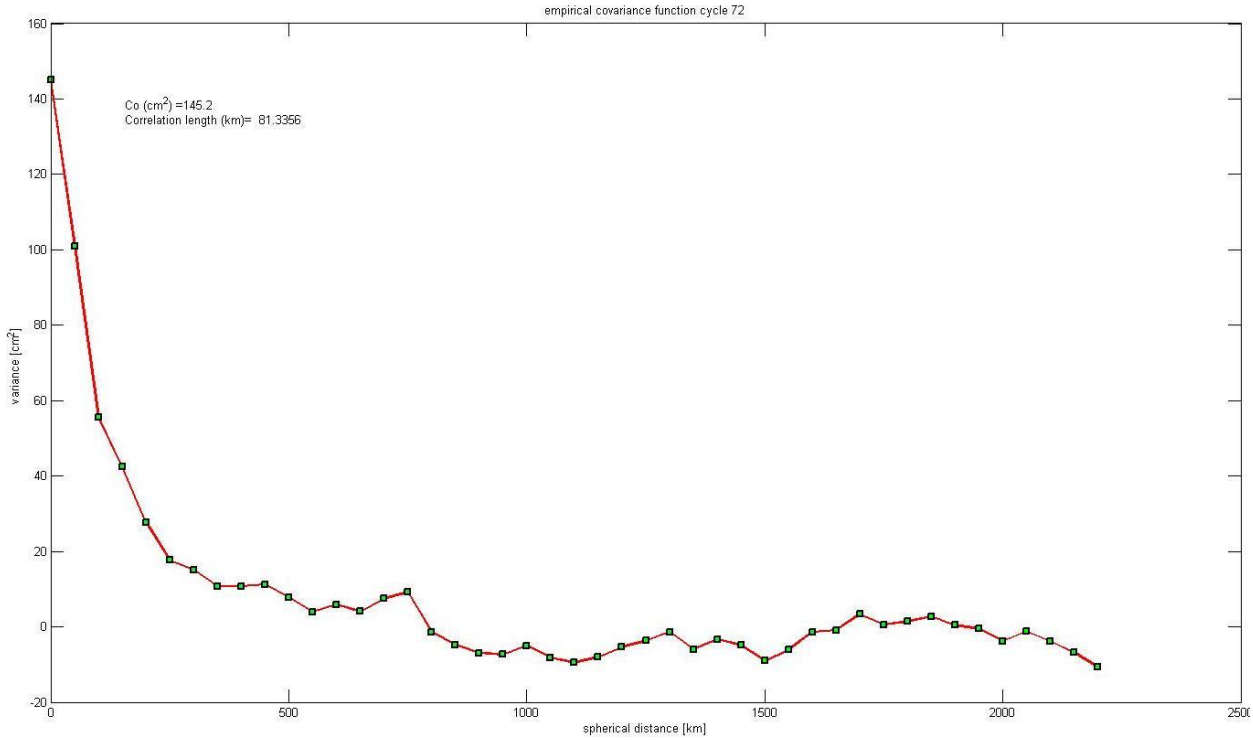
Σχήμα 4.113: Τιμές εμπειρικής ΣΣ για τον κύκλο 67



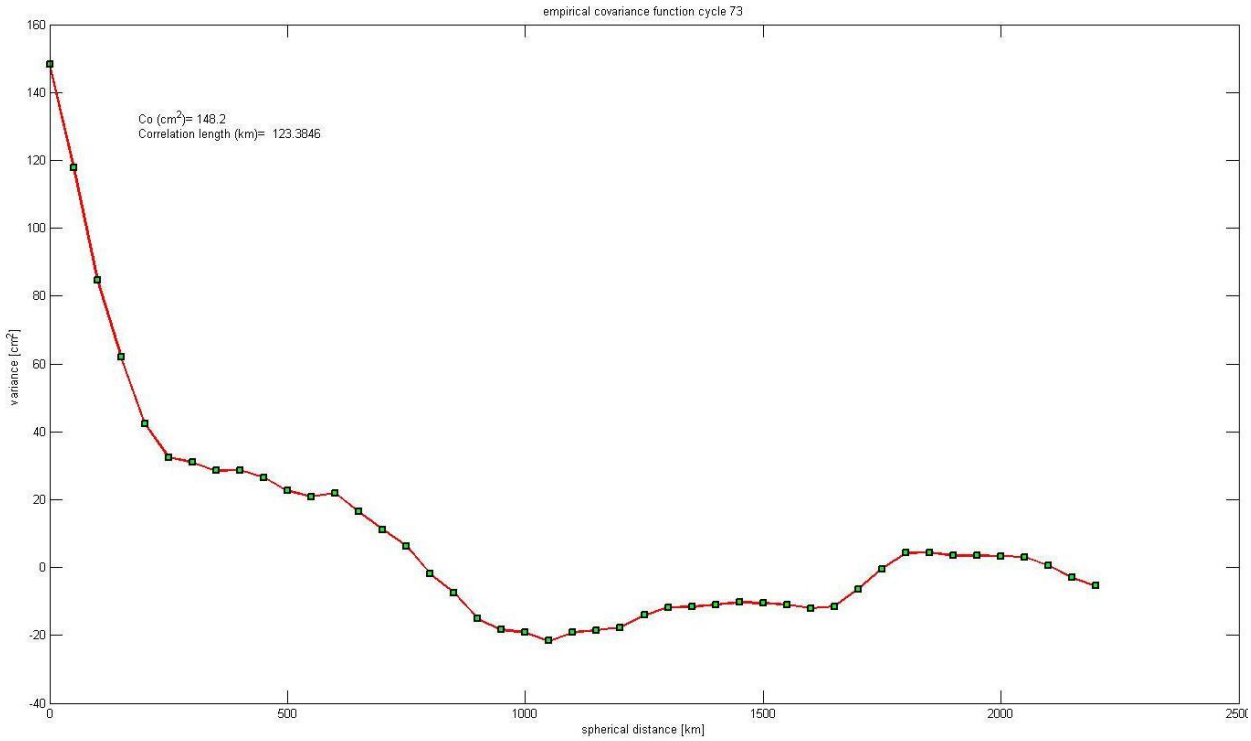
Σχήμα 4.114: Τιμές εμπειρικής ΣΣ για τον κύκλο 69



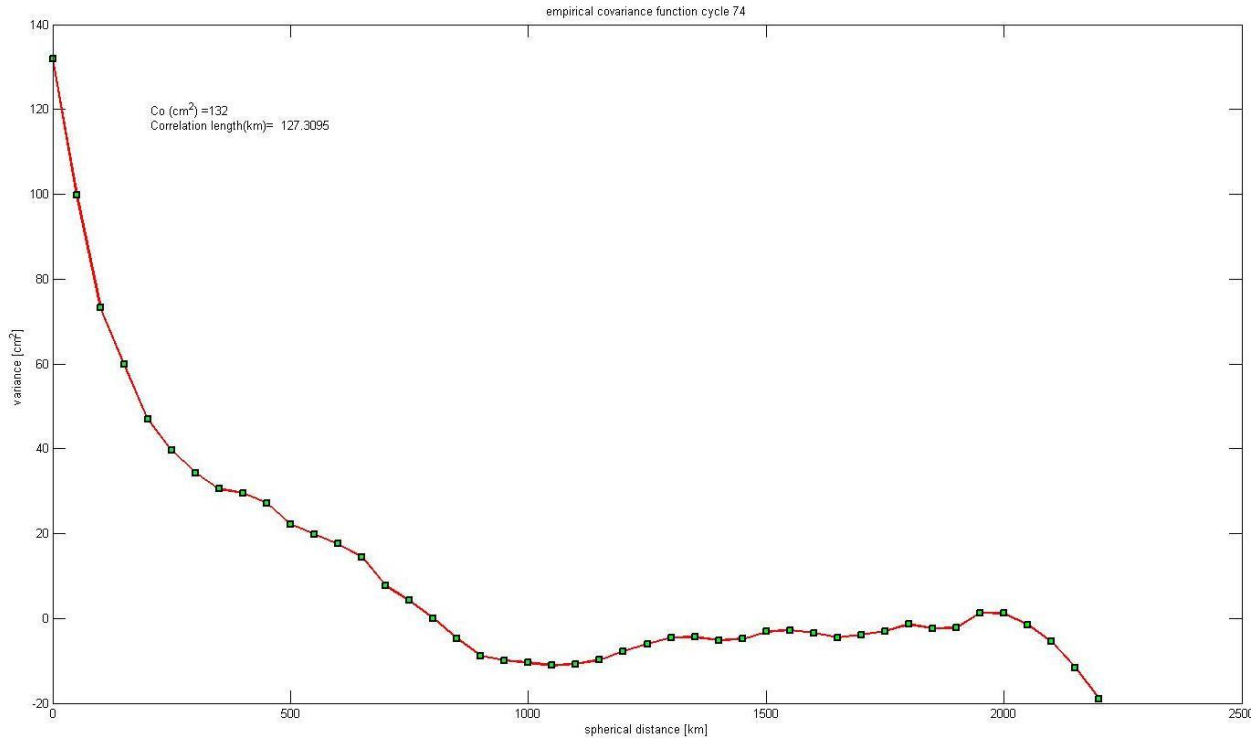
Σχήμα 4.115: Τιμές εμπειρικής ΣΣ για τον κύκλο 71



Σχήμα 4.116: Τιμές εμπειρικής ΣΣ για τον κύκλο 72



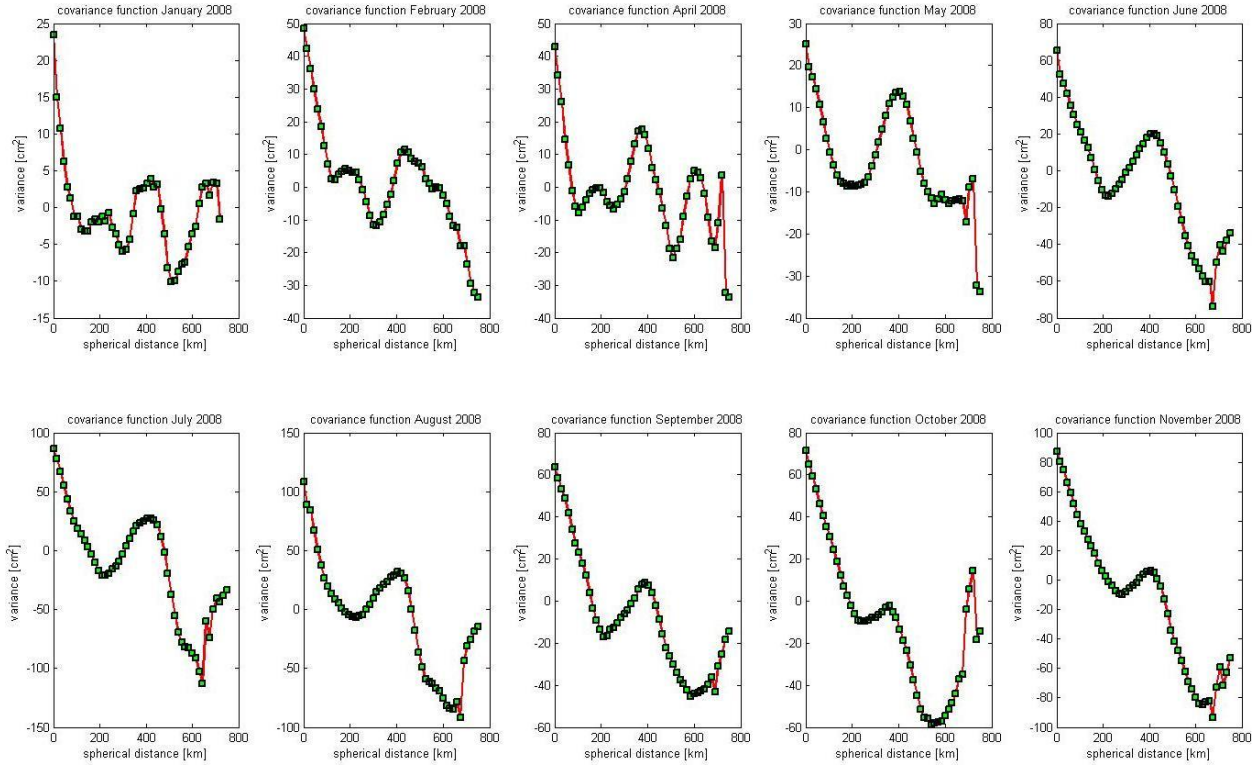
Σχήμα 4.117: Τιμές εμπειρικής ΣΣ για τον κύκλο 73



Σχήμα 4.118: Τιμές εμπειρικής ΣΣ για τον κύκλο 74

Πίνακας 4.6: Χαρακτηριστικά των εμπειρικών ΣΣ των κύκλων της χρονιάς 2008

ΚΥΚΛΟΣ	ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΔΕΔΟΜ.	ΠΛΗΘΟΣ ΔΕΔΟΜ.	Co (cm^2)	ξ (km)
65	07/01/08-11/02/08	10592	164.9	175
66	11/02/08-17/03/08	7026	140.3	144
67	17/03/08-21/04/08	11825	144.6	136
68	21/04/08-26/05/08	10821	209.5	256
69	26/05/08-30/06/08	11377	207.2	275
70	30/06/08-04/08/08	11719	173.4	197
71	04/08/08-08/09/08	11450	143.2	145
72	08/09/08-13/10/08	8324	145.2	81
73	13/10/08-17/11/08	11377	148.2	123
74	17/11/08-22/12/08	11871	**2.** 132.0	127

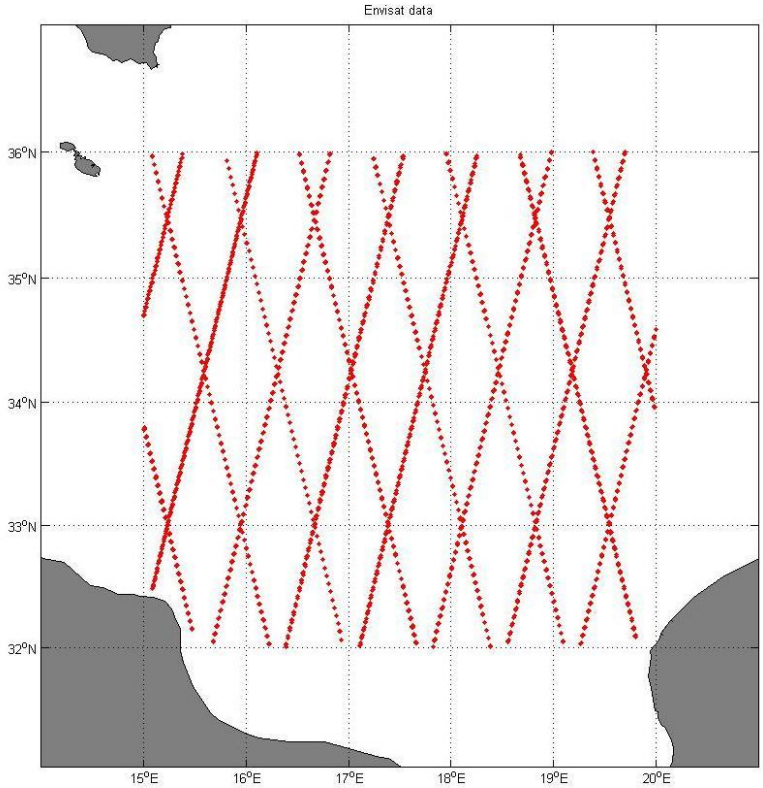


Σχήμα 4.119: Τιμές εμπειρικής ΣΣ για τη δορυφορική διάβαση 444 το 2008

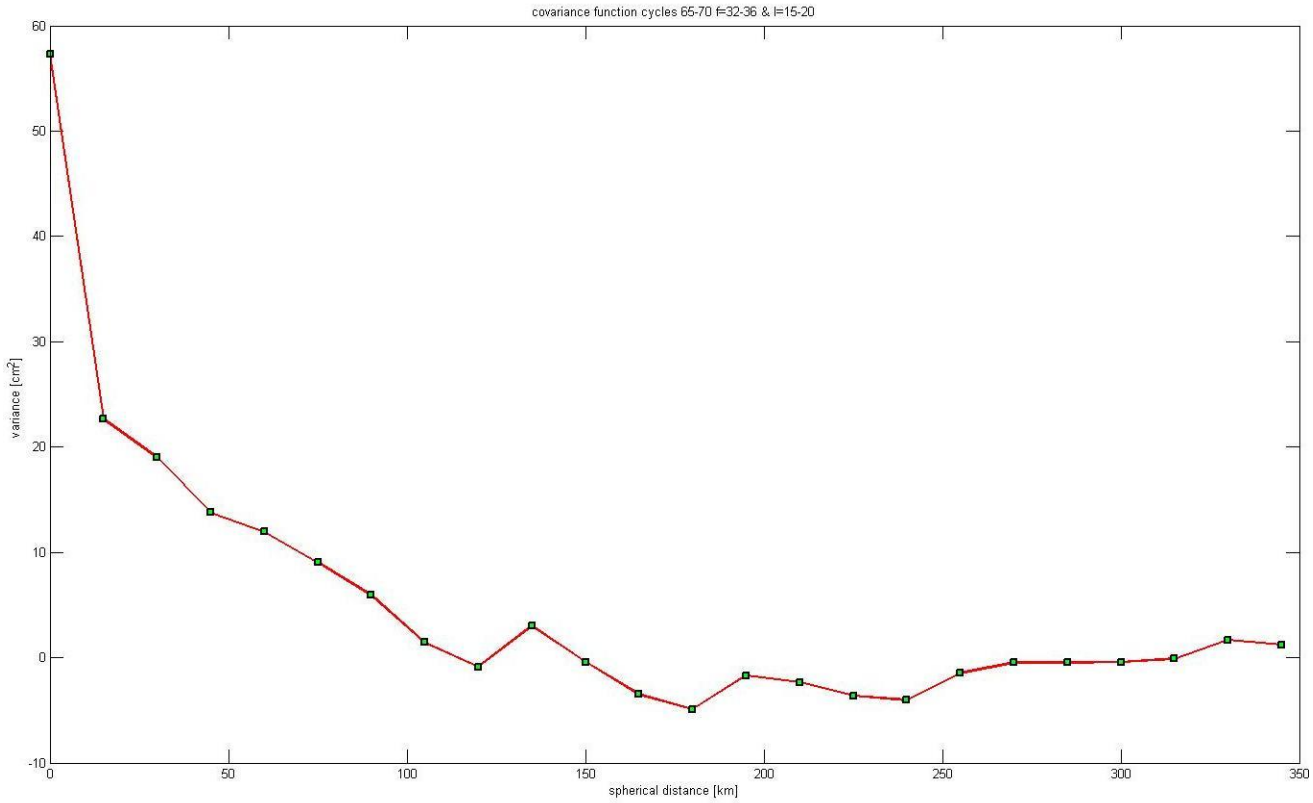
Από τη μελέτη των παραπάνω σχημάτων καθώς και του πίνακα 4.6 παρατηρούμε αρχικά πως η τάση για μεγάλες τιμές της μεταβλητότητας τους μήνες Ιούνιο-Ιούλιο-Αύγουστο του 2008 που παρατηρήθηκε για τη διάβαση 444 (Σχήμα 4.122) ανακλάται και στο σύνολο των διαβάσεων της ίδιας χρονιάς (Σχήματα 4.115-4.117 & Πίνακας 4.6). Είναι χαρακτηριστικό πως για το σύνολο των διαβάσεων οι σημαντικά μεγαλύτερες τιμές μεταβλητότητας παρατηρούνται τους ίδιους μήνες. Επίσης, το μέτρο της

διαφοράς μεταξύ των μεταβλητοτήτων μεταξύ των μηνών είναι το ίδιο και στις δύο περιπτώσεις και το μόνο που αλλάζει είναι το μέγεθος της τιμής της μεταβλητότητας. Ένα ακόμη συμπέρασμα για τη ΣΣ προκύπτει από τη μελέτη του Πίνακα 4.6. Συγκεκριμένα, η τιμή της μεταβλητότητας δεν εξαρτάται από το πλήθος των δεδομένων. Είναι χαρακτηριστικό πως η μεταβλητότητα 7026 δεδομένων είναι 140.3 cm^2 ενώ η αντίστοιχη τιμή 11871 δεδομένων είναι 132 cm^2. Επομένως, η τιμή της μεταβλητότητας για τις ανωμαλίες της επιφάνειας της θάλασσας, για την περιοχή της Μεσογείου, μπορεί να περιγραφεί και από μικρότερο πλήθος δεδομένων στο πλαίσιο της μεταβολής που παρουσιάζουν σε διάστημα 35 ημερών. Τέλος, το μήκος συσχέτισης, όταν η ΣΣ ακολουθεί την τυπική της μορφή, είναι ανάλογο με το μέγεθος της μεταβλητότητας (π.χ. για τις τιμές της Co 209.5, 207.2 και 173.4 cm^2 παρατηρούνται αντίστοιχα τα μήκη συσχέτισης 256, 275 και 197 km).

Εκτός από το σύνολο των περασμάτων στη Μεσόγειο μελετήθηκε και ένα συγκεκριμένο παράθυρο δεδομένων. Εξετάστηκε ειδικότερα για τους κύκλους από 65 ως 70 το πλήθος των δεδομένων που βρισκόταν στην περιοχή με γεωγραφικό πλάτος 32°≤ φ ≤36° και γεωγραφικό μήκος 15°≤ λ ≤20°. Από τα 63360 δεδομένα που υπήρχαν σε εκείνη την περιοχή μόνο 3910 εγγραφές (6%) βρέθηκαν εντός των ορίων που θέσαμε. Για τη δημιουργία της ΣΣ επιλέξαμε τις παραμέτρους που είχαμε θέσει και για τη ΣΣ στην along track περίπτωση, αφενός γιατί είχαμε να κάνουμε με περιορισμένο αριθμό δεδομένων και αφετέρου της μικρής έκτασης της περιοχής μελέτης (4°×5°).



Σχήμα 4.120: Πλέγμα δεδομένων Envisat



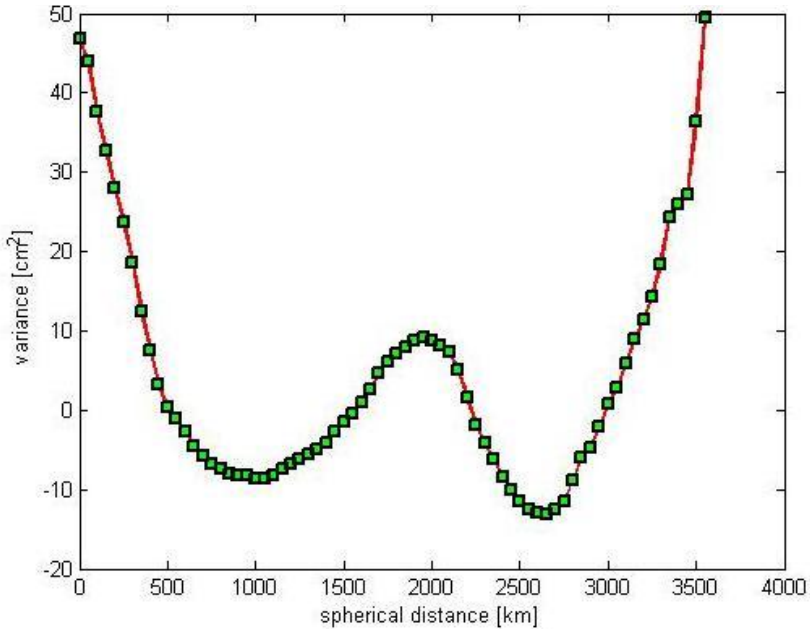
Σχήμα 4.121: Τιμές εμπειρικής ΣΣ για το παράθυρο δεδομένων

Από το παραπάνω Σχήμα 4.124 βλέπουμε ότι η τιμή της μεταβλητότητας Co βρίσκεται στα επίπεδα των ΣΣ που είχαμε παρατηρήσει στην περίπτωση των along track συναρτήσεων. Ειδικότερα, η τιμή της ~60 cm^2 είναι πολύ μικρότερη των 140.3 cm^2 (κύκλος 66) που είναι η μικρότερη τιμή που παρατηρήθηκε στις cross track συναρτήσεις και αφορούσαν τα δεδομένα των ίδιων κύκλων. Ωστόσο η τιμή αυτή προσεγγίζει τη μέση τιμή των μεταβλητοτήτων (~56 cm^2) της διάβασης 444 για το ίδιο χρονικό διάστημα (συναρτήσεις της διάβασης στους αντίστοιχους κύκλους). Η περιοχή του παράθυρου δεδομένων έχει την ίδια περίπου έκταση με αυτήν της περίπτωσης της along track συνάρτησης και για δεδομένα που αφορούν το ίδιο χρονικό διάστημα οι τιμές της Co είναι περίπου ίσες. Επομένως η τιμή της μεταβλητότητας επηρεάζεται από το εύρος της περιοχής μελέτης, καθώς μεγαλύτερη έκταση συνεπάγεται και μεγαλύτερη τιμή της μεταβλητότητας Co.

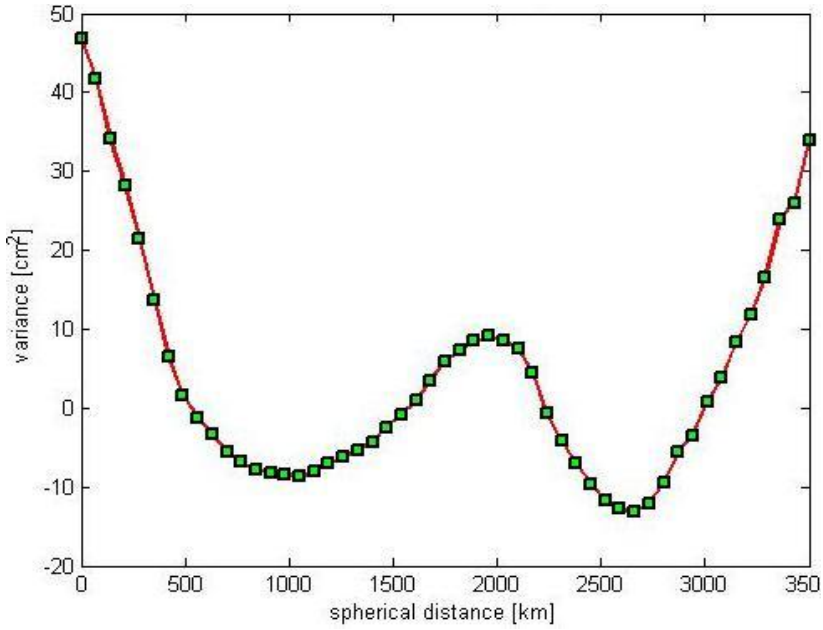
4.6 Εμπειρική Συνάρτηση για το μοντέλο ΣΣΤΕΘ της Rio

Μία ακόμη εμπειρική ΣΣ που υπολογίστηκε ήταν αυτή που αφορούσε τη δυναμική θαλάσσια τοπογραφία του μοντέλου της Rio. Ειδικότερα, είχαμε στη διάθεση μας τιμές της μέσης σύνθετης δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας σε μέτρα (Dynamic Ocean Topography) σε ένα πλέγμα τιμών 1/8°×1/8° για το χρονικό διάστημα 1993-1999. Οι τιμές για το μοντέλο προέκυψαν από αλτιμετρικά δεδομένα, επιτόπιες μετρήσεις καθώς και ένα γενικό μοντέλο κυκλοφορίας. Η όλη διαδικασία περιγράφεται από τους Rio et al. (2007).Για να καταλήξουμε στη ΣΣ η οποία αντανακλά καλύτερα τα στατιστικά χαρακτηριστικά

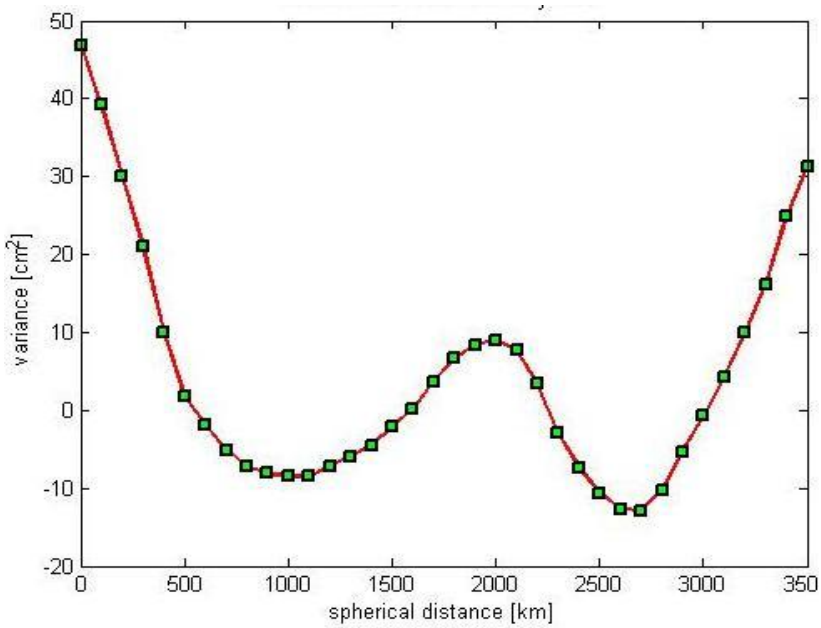
της δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας ακολουθήσαμε την ίδια διαδικασία με τις υπόλοιπες ΣΣ μέσω διαδοχικών δοκιμών για το βήμα των κλάσεων. Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται διάφορες ΣΣ που υπολογίστηκαν μέχρι να καταλήξουμε σε αυτήν με βήμα 250 km, την οποία και τελικά χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα εργασία.



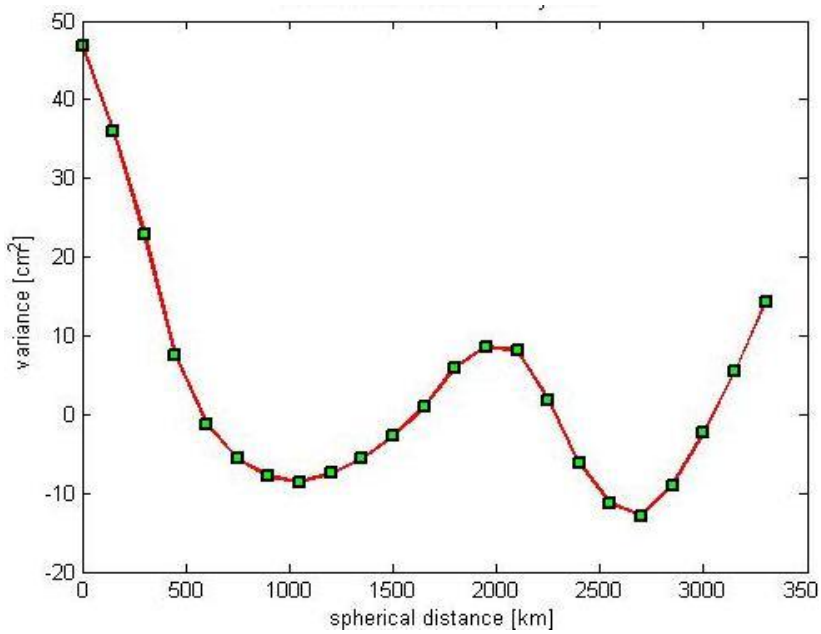
Σχήμα 4.122: Τιμές εμπειρικής ΣΣ rio_med με βήμα 50 km



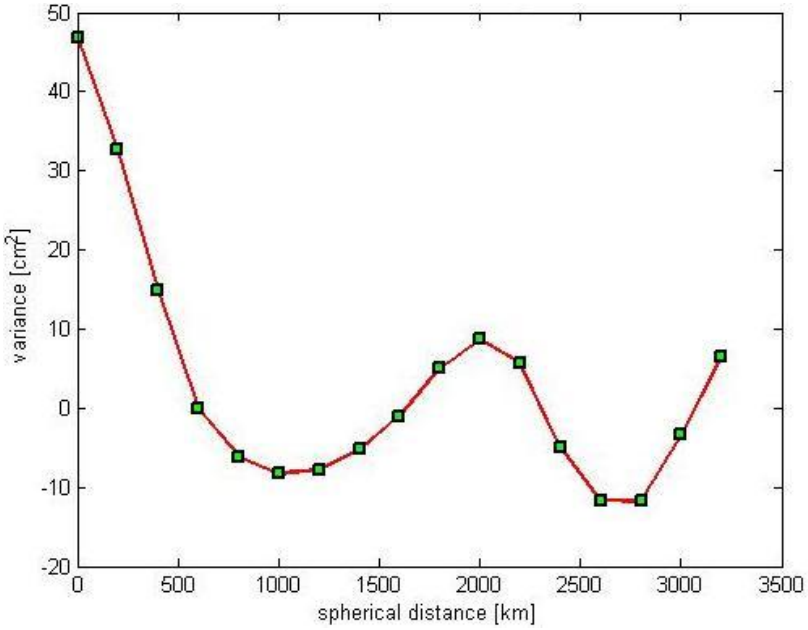
Σχήμα 4.123: Τιμές εμπειρικής ΣΣ rio_med με βήμα 70 km



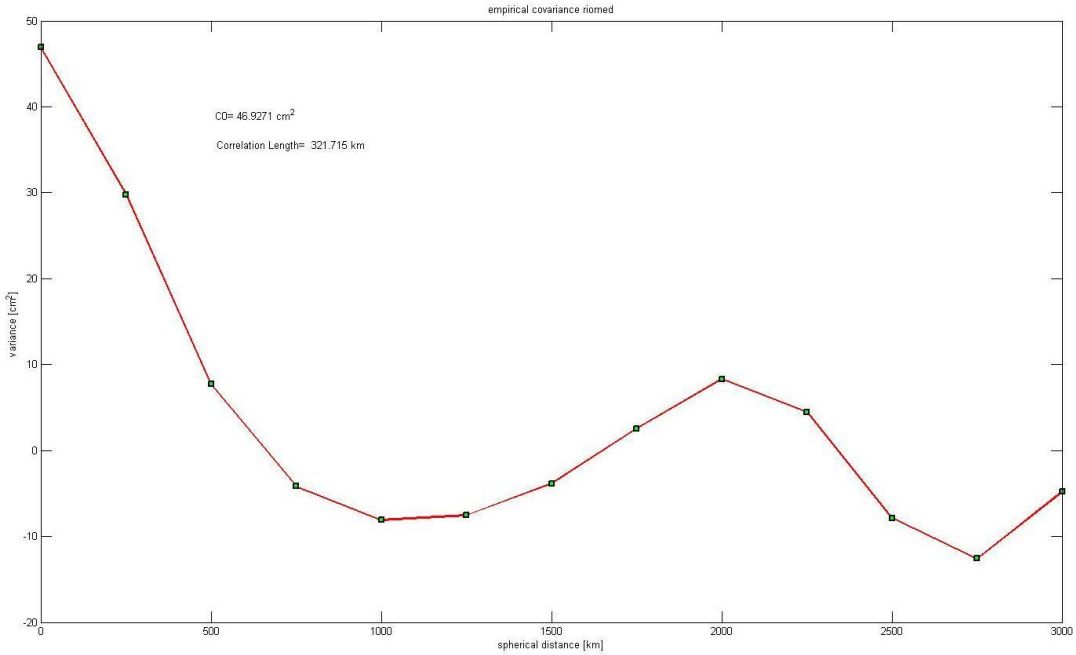
Σχήμα 4.124: Τιμές εμπειρικής ΣΣ rio_med με βήμα 100 km



Σχήμα 4.125: Τιμές εμπειρικής ΣΣ rio_med με βήμα 150 km



Σχήμα 4.126: Τιμές εμπειρικής ΣΣ rio_med με βήμα 200 km



Σχήμα 4.127: Τιμές εμπειρικής ΣΣ rio_med με βήμα 250 km

Από τη μελέτη των ανωτέρω σχημάτων βλέπουμε πως η μορφή της ΣΣ ελάχιστα αλλάζει με τη διαφοροποίηση της επιλογής του βήματος και εξαρτάται κυρίως από το μήκος απεικόνισης. Η τιμή της Co είναι 46 cm^2 προσεγγίζοντας την πλειοψηφία των τιμών των μεταβλητοτήτων της SLA, ενώ η μορφή της ΣΣ

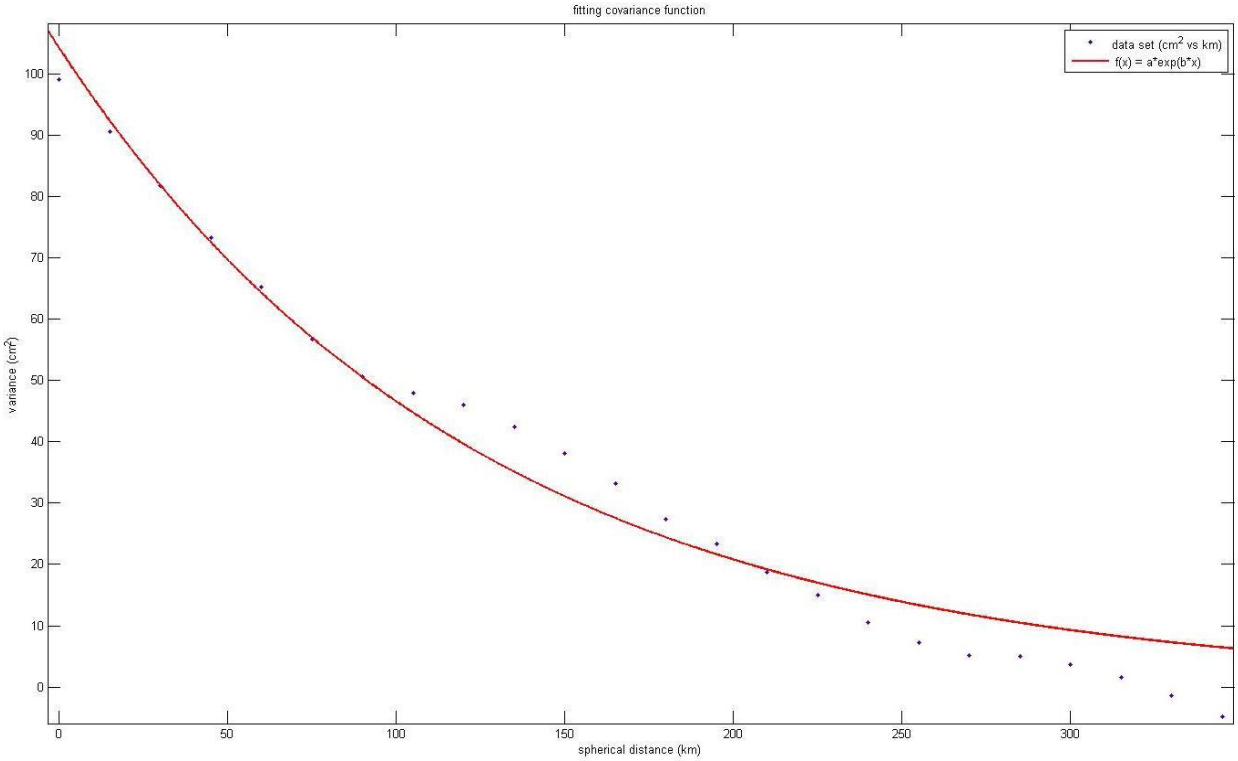
ακολουθεί την τυπική μορφή. Το μοναδικό στοιχείο που δεν συμβαδίζει με τα χαρακτηριστικά των ΣΣ που είχαμε συναντήσει έως τώρα είναι το μήκος συσχέτισης, το οποίο είναι αρκετά μεγάλο (~321 km) για μια τόσο μικρή τιμή της μεταβλητότητας (46 cm^2). Ωστόσο, αυτό αποδίδεται στην ομαλή χωρική μεταβολή της ΣΣ, όπως αναμένεται άλλωστε για την μέση τοπογραφία της επιφάνειας της θάλασσας, με αποτέλεσμα το μήκος συσχέτισης να έχει μεγαλύτερη τιμή.

4.7 Αναλυτικές Συναρτήσεις along-track

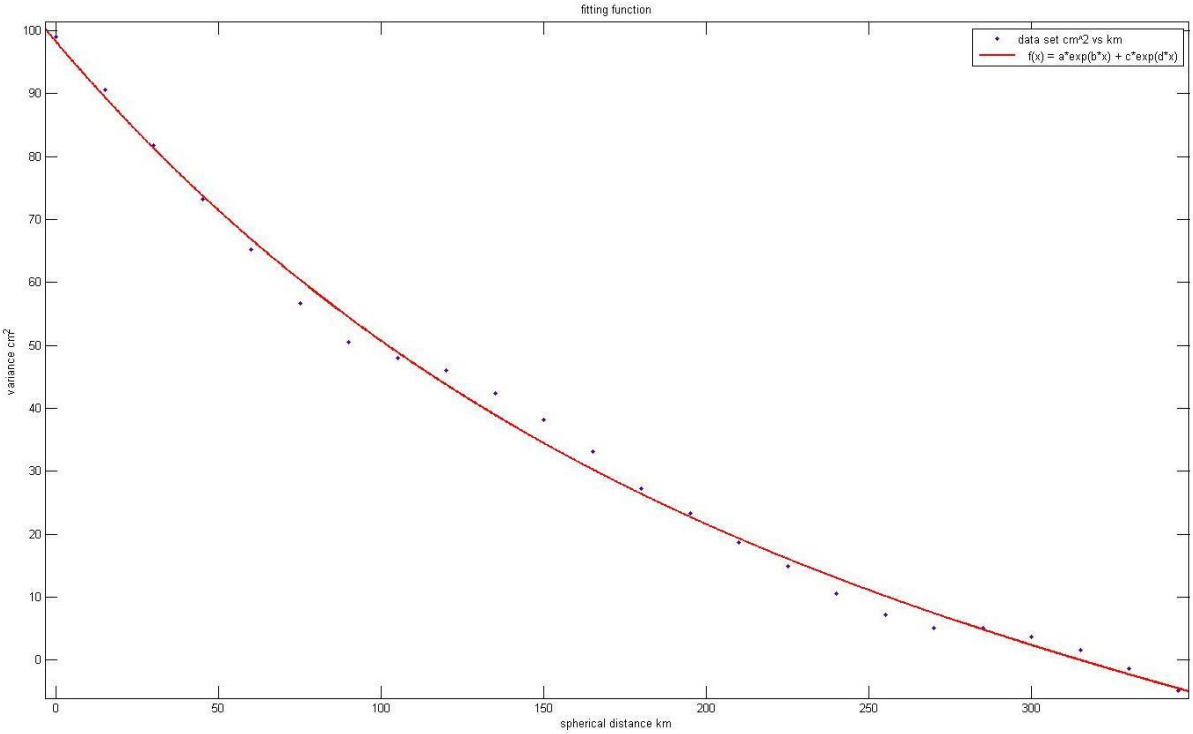
Προκειμένου να προσδιοριστούν αναλυτικές ΣΣ για την εμπειρική συνάρτηση τη διάβαση 444 (όπως έχουμε αναφέρει είναι η διάβαση ηοποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία) εξετάστηκαν διάφορες επιλογές. Η πρώτη αφορούσε έξι εκθετικά μοντέλα, η δεύτερη τις συναρτήσεις Markov δεύτερου και τρίτου βαθμού, ενώ τέλος εξετάστηκε και ένα μοντέλο σφαιρικών αρμονικών. Οι συντελεστές όλων των μοντέλων προσδιορίστηκαν μέσω του Matlab. Ειδικότερα, δημιουργήσαμε ένα σετ δεδομένων με τις τιμές της εμπειρικής ΣΣ σε κάθε κλάση. Για τα εκθετικά μοντέλα ακολουθήσαμε την εξής διαδικασία: μέσω της εντολής cftool, επιλέγαμε το σετ των δεδομένων (τιμές εμπειρικής ΣΣ και κλάση) και στη συνέχεια τον τύπο της συνάρτησης στον οποίο θέλαμε να προσαρμοστούν τα δεδομένα. Ο τύπος της συνάρτησης βρίσκεται είτε στη βιβλιοθήκη του matlab είτε εισάγεται από τον χρήστη. Οι συντελεστές σε κάθε τύπο αναλυτικής συνάρτησης προσδιορίζονται αυτόματα από το matlab μέσω του αλγορίθμου trust region. Αντίθετα, για τους άλλους δύο τύπους μοντέλων, οι συντελεστές προσδιορίστηκαν μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων. Στη συνέχεια θα δοθούν απεικονίσεις των συναρτήσεων και οι τιμές των συντελεστών για κάθε τύπο αναλυτικής ΣΣ που προσδιορίστηκε.

Εκθετικά μοντέλα

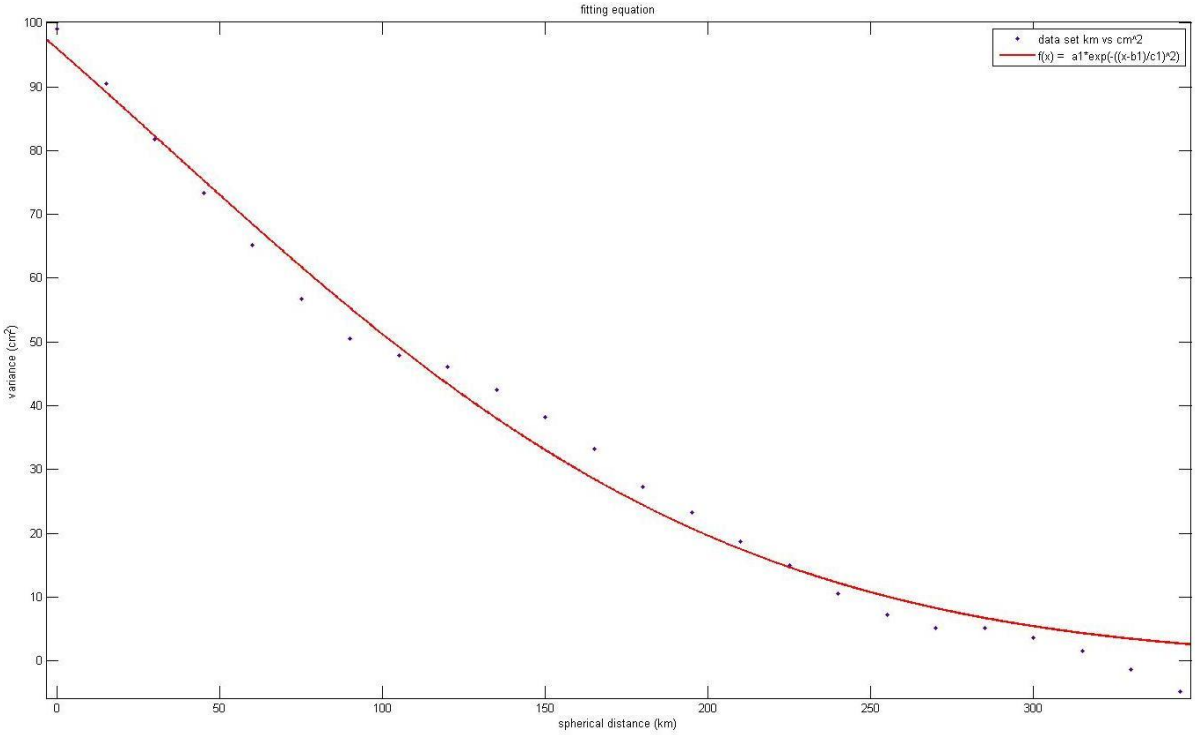
Στα σχήματα που ακολουθούν θα δούμε την προσαρμογή των μοντέλων στις τιμές της εμπειρικής ΣΣ (Εξ. 2.7-2.12). Η προσαρμογή των μοντέλων, εκτός από τα σχήματα, αποτυπώνεται και στα αποτελέσματα της πρόγνωσης τα οποία θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο. Σε όλα τα σχήματα με κόκκινο αναπαρίσταται η αναλυτική ΣΣ ενώ με τα μπλε τετράγωνα οι τιμές της εμπειρικής ΣΣ από τις οποίες προέκυψε η αναλυτική. Η προσαρμογή έγινε μόνο στο μήκος σχεδίασης της ΣΣ ενώ για τον υπολογισμό των συντελεστών του κάθε μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν όλες οι διαθέσιμες τιμές της εμπειρικής ΣΣ. Όπως διαπιστώνεται και από τα σχήματα, όλες οι αναλυτικές ΣΣ δεν προσαρμόζονται το ίδιο καλά στις τιμές της εμπειρικής, ενώ ανάλογα με το μοντέλο της αναλυτικής έχουμε καλύτερα αποτελέσματα σε διαφορετικά τμήματα της εμπειρικής συνάρτησης.



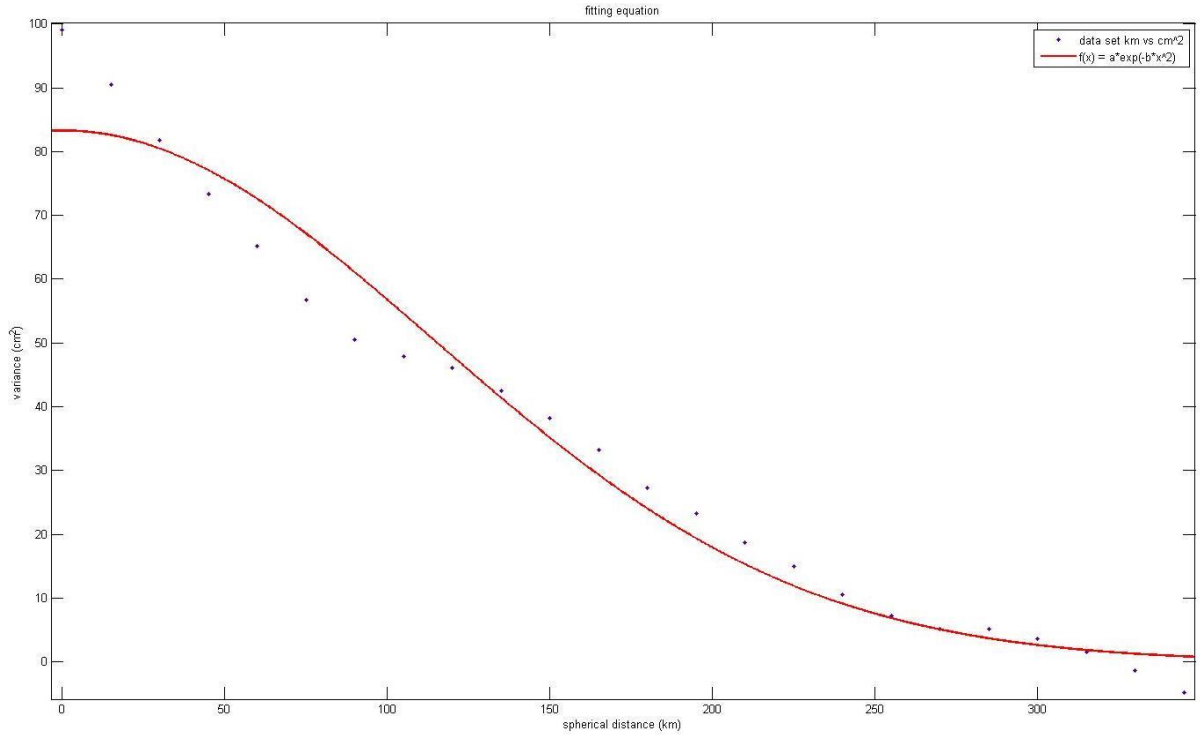
Σχήμα 4.128: Αναλυτική ΣΣ με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi) = \alpha e^{b\psi}$



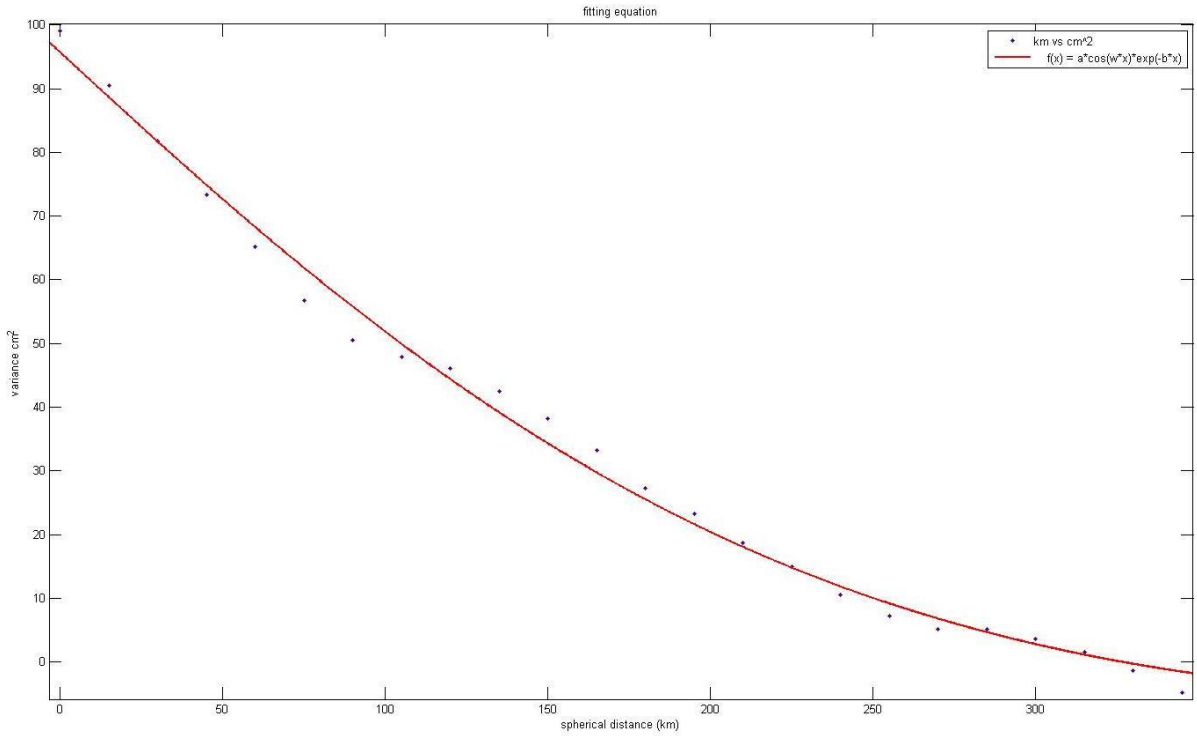
Σχήμα 4.129: Αναλυτική ΣΣ με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi) = \alpha e^{b\psi} + ce^{d\psi}$



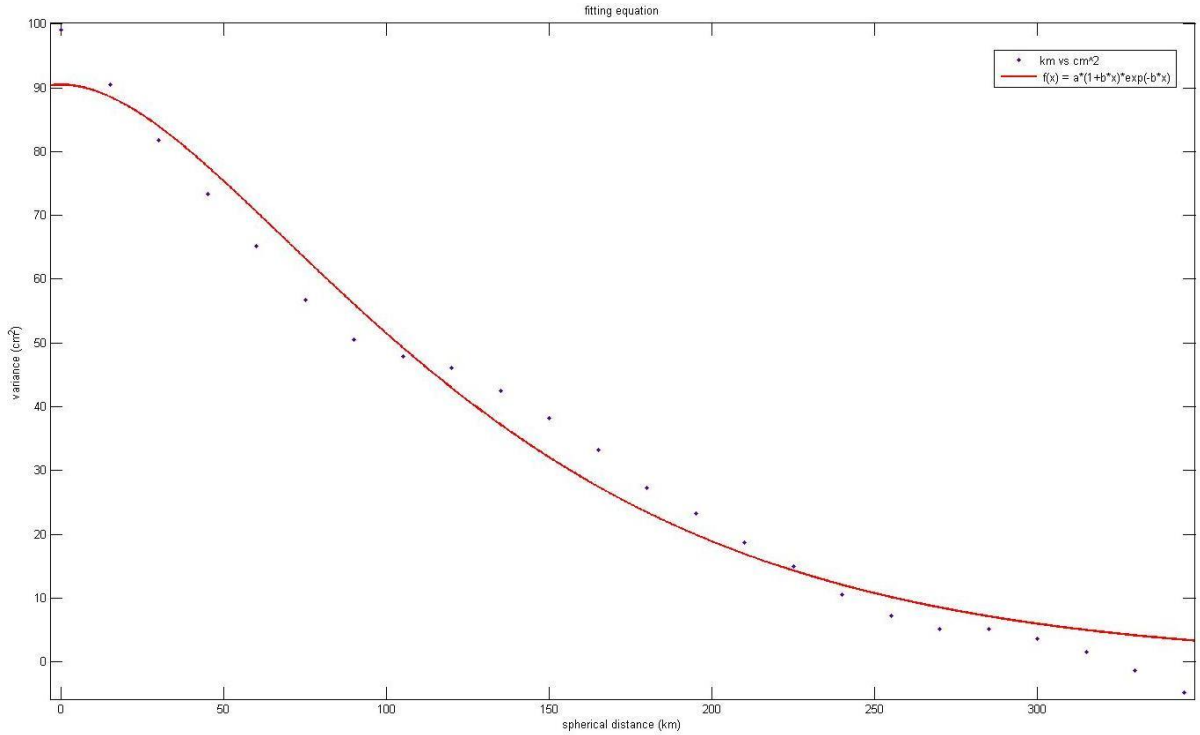
Σχήμα 4.130: Αναλυτική ΣΣ με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi) = \alpha e^{(-(\frac{(\psi-b)}{c})^2)}$



Σχήμα 4.131: Αναλυτική ΣΣ με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi) = \alpha e^{-b\psi^2}$



Σχήμα 4.132: Αναλυτική ΣΣ με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi) = \alpha e^{-b\psi} \cos(\omega\psi)$



Σχήμα 4.133: Αναλυτική ΣΣ με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi) = \alpha(1+b\psi)e^{-b\psi}$

Πίνακας 4.7: Τιμές αγνώστων συντελεστών αναλυτικών εκθετικών μοντέλων για τη διάβαση 444

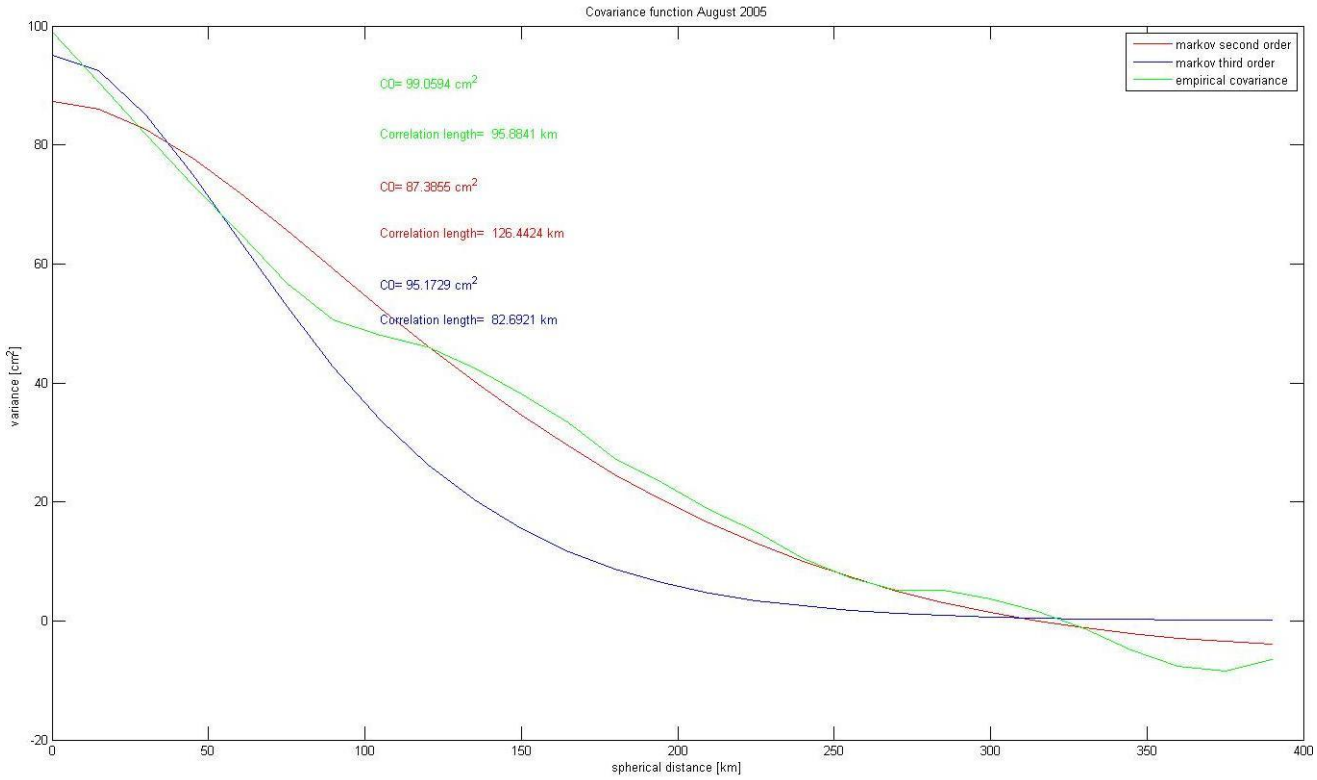
ΜΟΝΤΕΛΟ	1ο	2ο	3ο	4ο	5ο	6ο
a	104.1	105.2	133.1	83.29	95.64	90.47
b	-0.008	-0.006	-141.2	$3.81*10^{-5}$	0.005	0.014
c		-7.001	246.6			
d		0.003				
w					0.005	

Όπως παρατηρούμε στα παραπάνω σχήματα, τα μοντέλα που συνδυάζουν δύο ή περισσότερες συναρτήσεις προσαρμόζονται καλύτερα στην εμπειρική. Ειδικότερα, το δεύτερο μοντέλο (άθροισμα δύο εκθετικών), το πέμπτο (γινόμενο εκθετικής και τριγωνομετρικής) και το έκτο (γινόμενο αθροίσματος και εκθετικής) προσεγγίζουν καλύτερα την εμπειρική ΣΣ. Αντίθετα, οι άλλες τρεις συναρτήσεις προσεγγίζουν την εμπειρική σε ένα μόνο τμήμα της. Αυτό είναι λογικό, καθώς ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων συναρτήσεων έχει ως αποτέλεσμα η νέα συνάρτηση που δημιουργούν να μεταφέρει και να αποτυπώνει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους και τελικά να προσαρμόζεται καλύτερα σε οποιαδήποτε μορφή συνάρτησης. Ειδικότερα, η ΣΣ ανταποκρίνεται κυρίως σε μια μορφή εκθετικής στο μεγαλύτερο τμήμα της. Ωστόσο, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του μεγέθους που αναπαριστά παίρνει και την αντίστοιχη μορφή. Όσο πιο ομαλά μεταβάλλεται το μέγεθος, τόσο πιο ομαλή είναι και η μορφή της. Έτσι, στην προκειμένη περίπτωση το μοντέλο που συνδυάζει μια εκθετική και μία τριγωνομετρική συνάρτηση, προσεγγίζει

περισσότερο τη μορφή της εμπειρικής. Η SLA, λοιπόν, μεταβάλλεται ομαλά, γεγονός που αντανακλάται και στη μορφή της ΣΣ.Έτσι, το πέμπτο μοντέλο που αποτυπώνει και στοιχεία της τριγωνομετρικής συνάρτησης (ομαλή μορφή και μεταβολή) προσαρμόζεται καλύτερα στην εμπειρική ΣΣ της SLA.

Μοντέλα Gauss-Markov

Οι άγνωστοι συντελεστές των μοντέλων σ_o και d προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιώντας εξισώσεις συνθηκών (Εξ. 2.13-2.14).



Σχήμα 4.134: Αναλυτικές ΣΣ των Gauss-Markov μοντέλων

Πίνακας 4.8: Τιμές αγνώστων συντελεστών μοντέλων Gauss-Markov

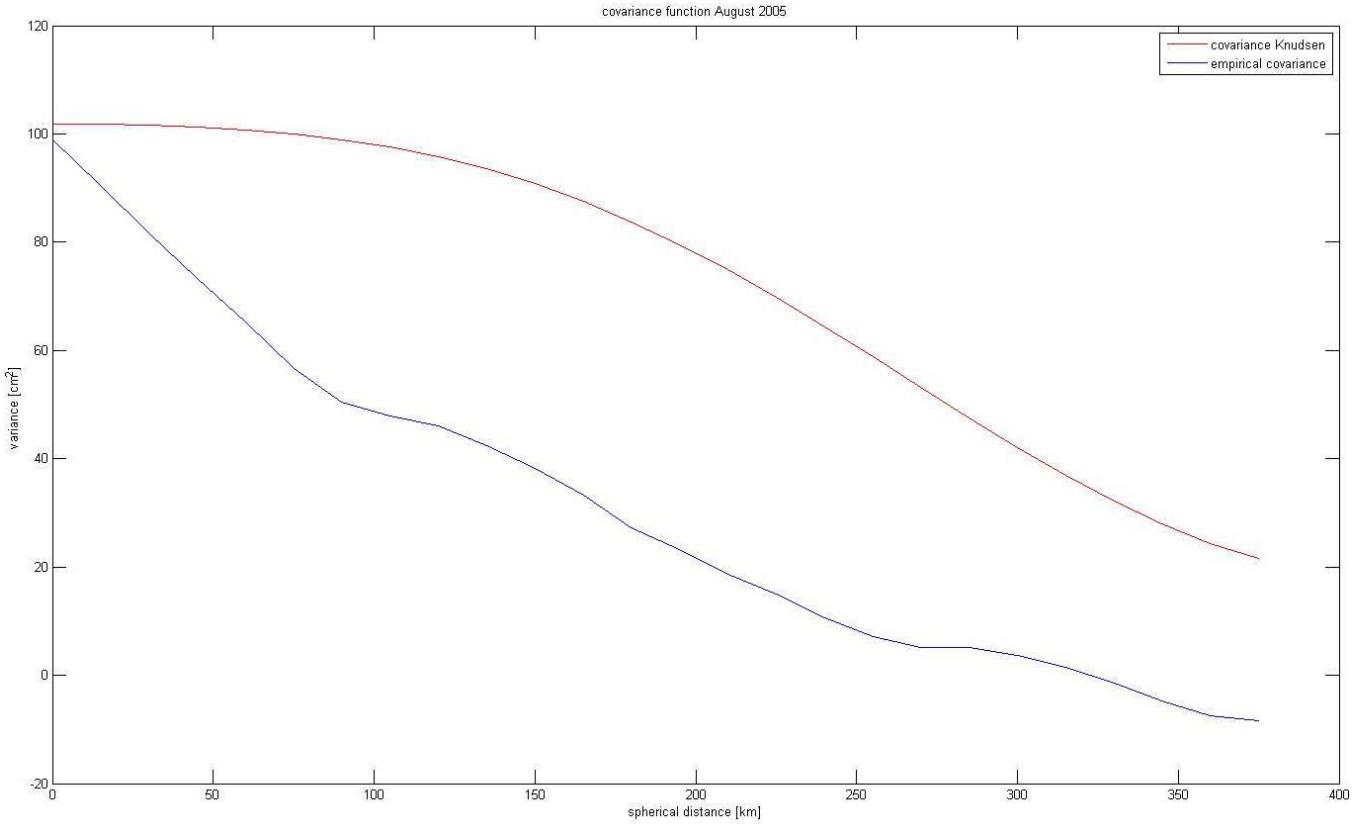
ΜΟΝΤΕΛΟ	Markov 2nd order	Markov 3rd order
σ_o^2 (cm^2)	87.39	95.17
d (km)	115.32	35.39

Από τη μελέτη του παραπάνω Σχήματος βλέπουμε πως η μεταβλητότητα του μοντέλου τρίτου βαθμού είναι πιο κοντά στην αντίστοιχη τιμή της εμπειρικής συνάρτησης ($\sigma^2_{o\ \text{εμπειρικης}}$= 99.05 cm^2 και $\sigma^2_{o\ \text{τρίτου βαθμού}}$=95.17 cm^2). Αντίθετα, η μεταβλητότητα του δευτέρου βαθμού είναι αρκετά μικρότερη (87.39

cm^2). Το ίδιο συμβαίνει και με το μήκος συσχέτισης. Η τιμή του μοντέλου τρίτου βαθμού είναι 82.69 km, του δευτέρου 126.44 km ενώ η εμπειρική ΣΣ έχει μήκος συσχέτισης 95.88 km. Ωστόσο, παρά το γεγονός πως τα δύο αυτά χαρακτηριστικά μεγέθη της ΣΣ του μοντέλου τρίτου βαθμού είναι πιο κοντά στα αντίστοιχα της εμπειρικής, η συνάρτηση δευτέρου βαθμού είναι αυτή που οπτικά φαίνεται να προσαρμόζεται καλύτερα στην εμπειρική. Το μοντέλο τρίτου βαθμού στα αρχικά μήκη σχεδίασης (~90 km) προσεγγίζει καλύτερα την εμπειρική και για αυτό τα χαρακτηριστικά μεγέθη της αναλυτικής συνάρτησης είναι κοντά στις τιμές της εμπειρικής. Στο υπόλοιπο τμήμα απομακρύνεται αρκετά από τις τιμές της εμπειρικής και μόνο στο τελευταίο κομμάτι, όπου οι τιμές είναι κοντά στο μηδέν, προσεγγίζει ξανά την εμπειρική συνάρτηση. Το μοντέλο δευτέρου βαθμού, μόνο στο πρώτο τμήμαι βρίσκεται μακριά από την εμπειρική. Στο υπόλοιπο τμήμα, μετά τα ~120 km, οι τιμές των δύο συναρτήσεων είναι πολύ κοντά, ενώ υπάρχουν και τμήματα (περίπου στα 250 km) όπου οι τιμές των δύο συναρτήσεων ταυτίζονται.

Μοντέλο σφαιρικών αρμονικών

Οι τιμές των αγνώστων συντελεστών b, k_1, k_2 και s (Εξ.2.39) προσδιορίστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε η το μήκος συσχέτισης και η μεταβλητότητα να προσεγγίζουν τις τιμές των αντίστοιχων μεγεθών της εμπειρικής. Ωστόσο, όπως θα δούμε στη συνέχεια τα αποτελέσματα δεν ήταν τα καλύτερα δυνατά και τις αιτίες αυτής της "αποτυχημένης" προσπάθειας θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε στη συνέχεια.



Σχήμα 4.135: Αναλυτική ΣΣ μοντέλου σφαιρικών αρμονικών

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.138 το μοντέλο των σφαιρικών αρμονικών προσεγγίζει την εμπειρική ΣΣ μόνο στην τιμή της μεταβλητότητας Co. Σε όλο το υπόλοιπο μήκος σχεδίασης, το μοντέλο σφαιρικών αρμονικών αποτελείται από μία καμπύλη η οποία απέχει αρκετά από την εμπειρική και η μορφή της δεν προσεγγίζει κάποια αποδεκτή μορφή ΣΣ. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να οφείλεται σε πολλούς παράγοντες που αξίζει να μελετηθούν σε μελλοντικές έρευνες. Από αντίστοιχες εργασίες, προέκυψε ότι ο προσδιορισμός των τιμών των αγνώστων συντελεστών για την μέση τοπογραφία της επιφάνειας της θάλασσας γίνεται εμπειρικά (Knudsen, 2012 και προκύπτουν από πολλές δοκιμές αποτελώντας έτσι εμπειρικές τιμές και όχι βέλτιστες εκτιμήσεις από κάποια διαδικασία συνόρθωσης. Αν και έγιναν αρκετές αριθμητικές δοκιμές δεν κατορθώσαμε να προσεγγίσουμε την εμπειρική ΣΣ. Οποιαδήποτε αλλαγή στην τιμή ενός συντελεστή δημιουργούσε μια νέα συνάρτηση που ήταν αρκετά διαφορετική από την προηγούμενη. Μια πιθανή αιτία για τη μεγάλη απόκλιση μεταξύ των δύο συναρτήσεων είναι η περιορισμένη έκταση της περιοχής μελέτης στην along track περίπτωση. Το μοντέλο του Knudsen δημιουργήθηκε για την περιοχή μεταξύ Μεγάλης Βρετανίας και Γροιλανδίας (Knudsen et al.,2004) και ίσως ένας συντελεστής κλίμακας να είναι απαραίτητος για την αναγωγή από μια μεγάλη περιοχή σε μία αρκετά μικρότερη. Επίσης, ο μικρός αριθμός διαθέσιμων δεδομένων ίσως να είναι μια άλλη αιτία. Ο αριθμός των παρατηρήσεων δεν προσφέρει επαρκή πληροφορία για τον προσδιορισμό των συντελεστών και οι τιμές αυτών αντικατοπτρίζουν τα χαρακτηριστικά μόνο για τη συγκεκριμένη διάβαση. Πράγματι, οι τιμές των συντελεστών που προσδιορίστηκαν, όταν εξετάστηκαν για τις τιμές μιας άλλης διάβασης, έδωσαν μια νέα μορφή συνάρτησης η οποία δεν παρουσίαζε κανένα κοινό στοιχείο με την προηγούμενη.

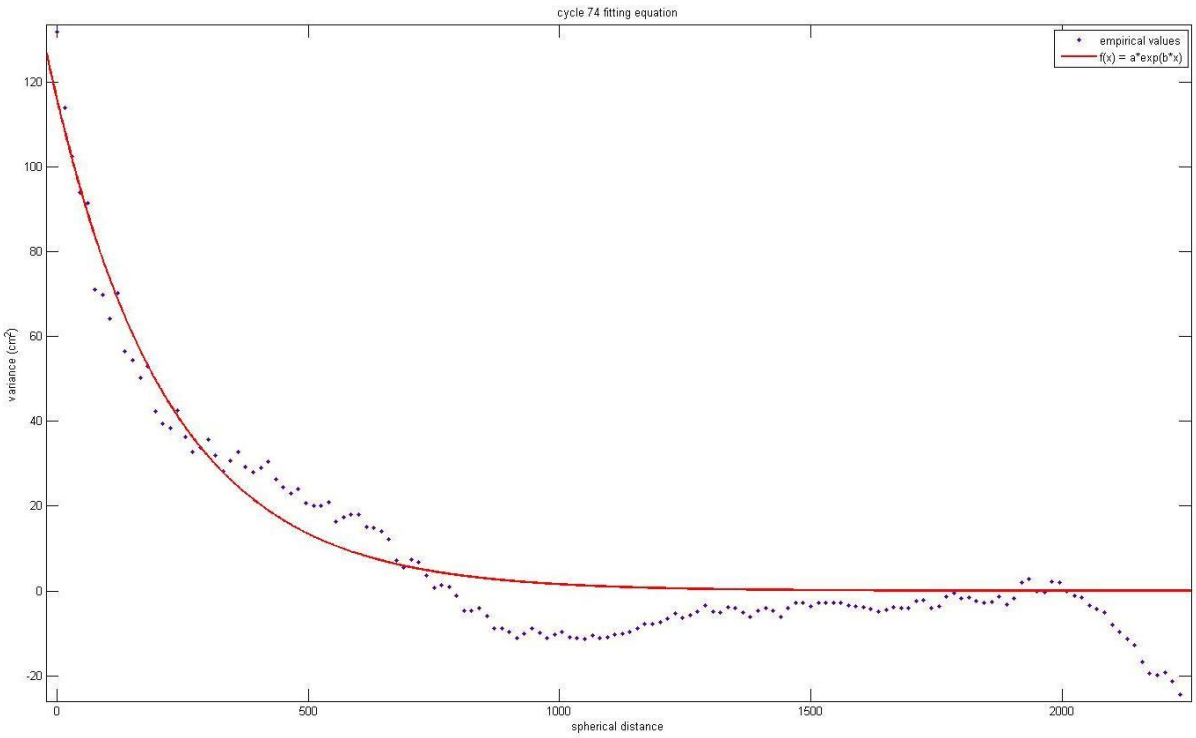
4.8 Αναλυτικές Συναρτήσεις cross-track

Βάσει των αποτελεσμάτων που έδωσε το αναλυτικό μοντέλο της ΣΣ που βασίζεται στο ανάπτυγμα σε πολυώνυμα Legendre, για την along track συνάρτηση, δεν εξετάστηκε για την περίπτωση των cross-track. Βέβαια, ο μεγάλος όγκος δεδομένων που απαιτούνταν για τον υπολογισμό σφαιρικών αρμονικών μεγάλου βαθμού και τάξης για ένα σύνολο σημείων άνω των 10.000 δεν ήταν διαχειρίσιμος από το matlab και προτείνεται να αποτελέσει σημείο έρευνας και υπολογισμού μελλοντικών εργασιών σε κάποια άλλη γλώσσα προγραμματισμού. Αποτέλεσμα αυτού ήταν να δημιουργηθούν αναλυτικές ΣΣ για τα δεδομένα ενός ολόκληρου κύκλου (cycle 74) με όλα τα εκθετικά μοντέλα και τα μοντέλα Gauss-Markov. Τα αποτελέσματα των εκθετικών συναρτήσεων στα δεδομένα του κύκλου 74 αποτέλεσαν το κριτήριο για τα ποια μοντέλα θα χρησιμοποιηθούν για τα παράθυρο δεδομένων. Στα σχήματα και τους πίνακες που ακολουθούν θα παρουσιαστούν οι αναλυτικές ΣΣ και οι τιμές των συντελεστών που προέκυψαν τόσο για τον κύκλο 74 αλλά και το παράθυρο δεδομένων που δημιουργήθηκε.

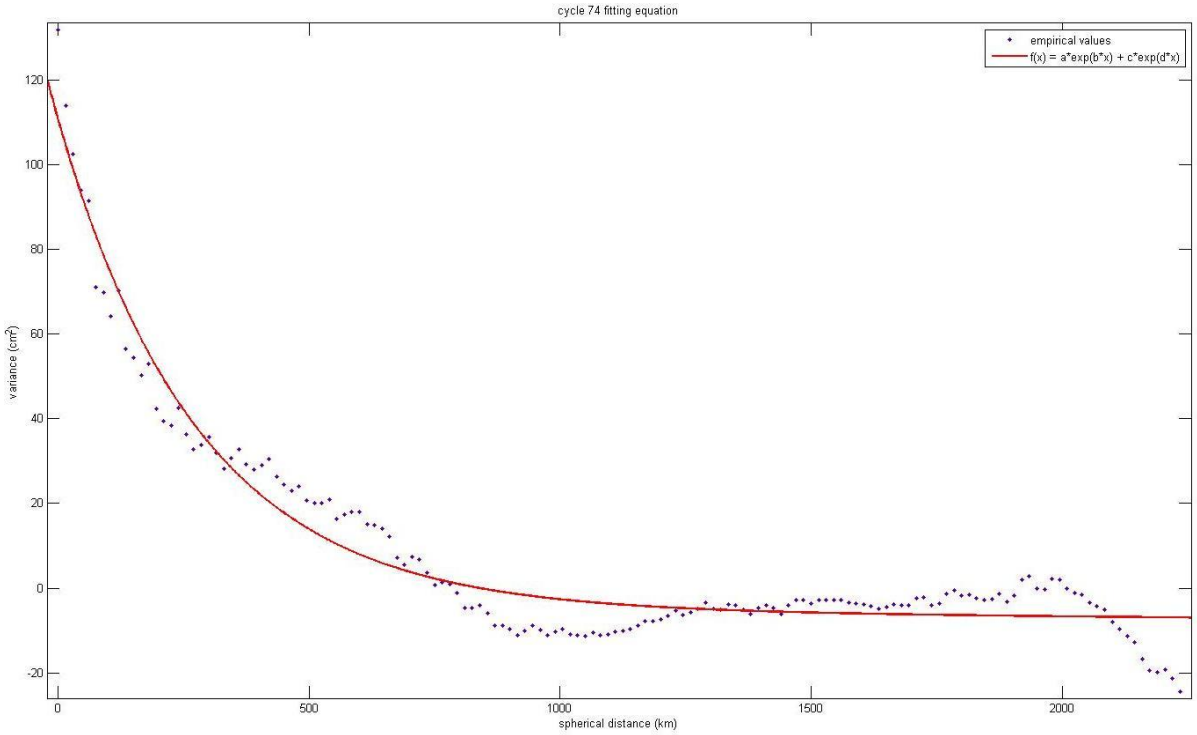
Εκθετικά μοντέλα

Τα έξι μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στην along track περίπτωση εξετάστηκαν και τον κύκλο 74. Το μεγάλο μήκος για το οποίο εξετάστηκε η ΣΣ είχε σαν αποτέλεσμα ορισμένα μοντέλα να μην

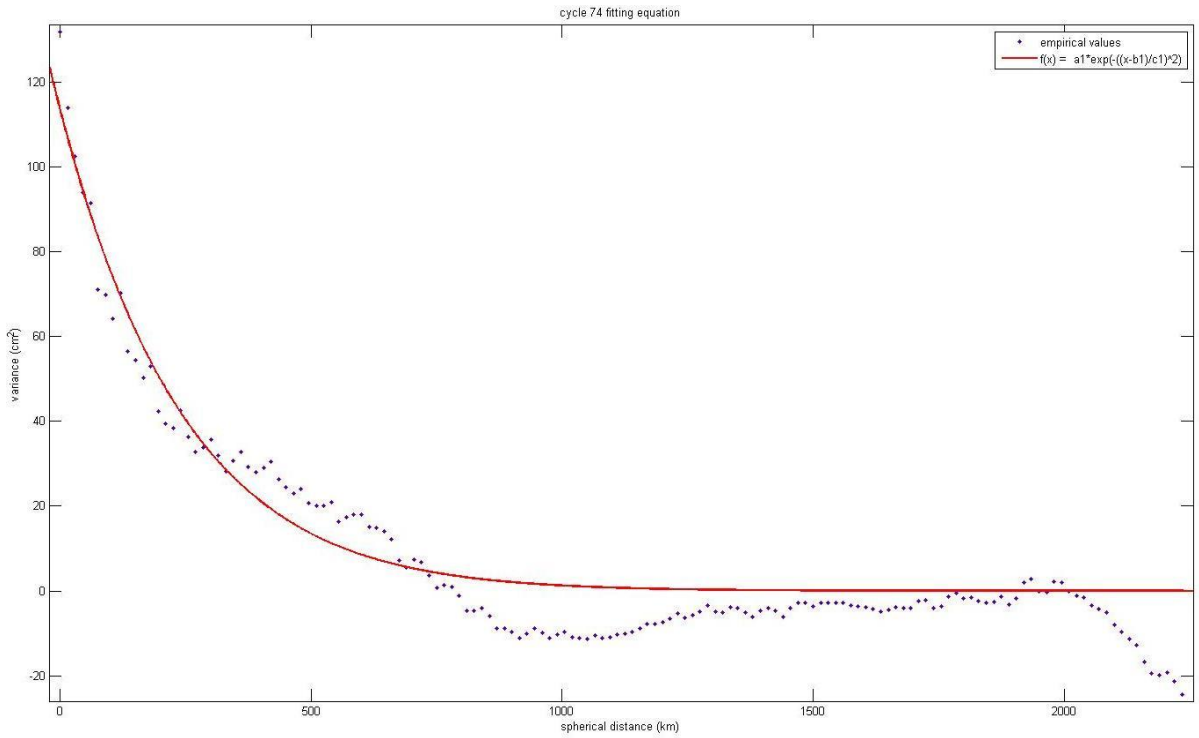
προσαρμοστούν ικανοποιητικά στην εμπειρική ΣΣ αντίθετα με την along track περίπτωση όπου οι διαφορές δεν ήταν τόσο έντονες.



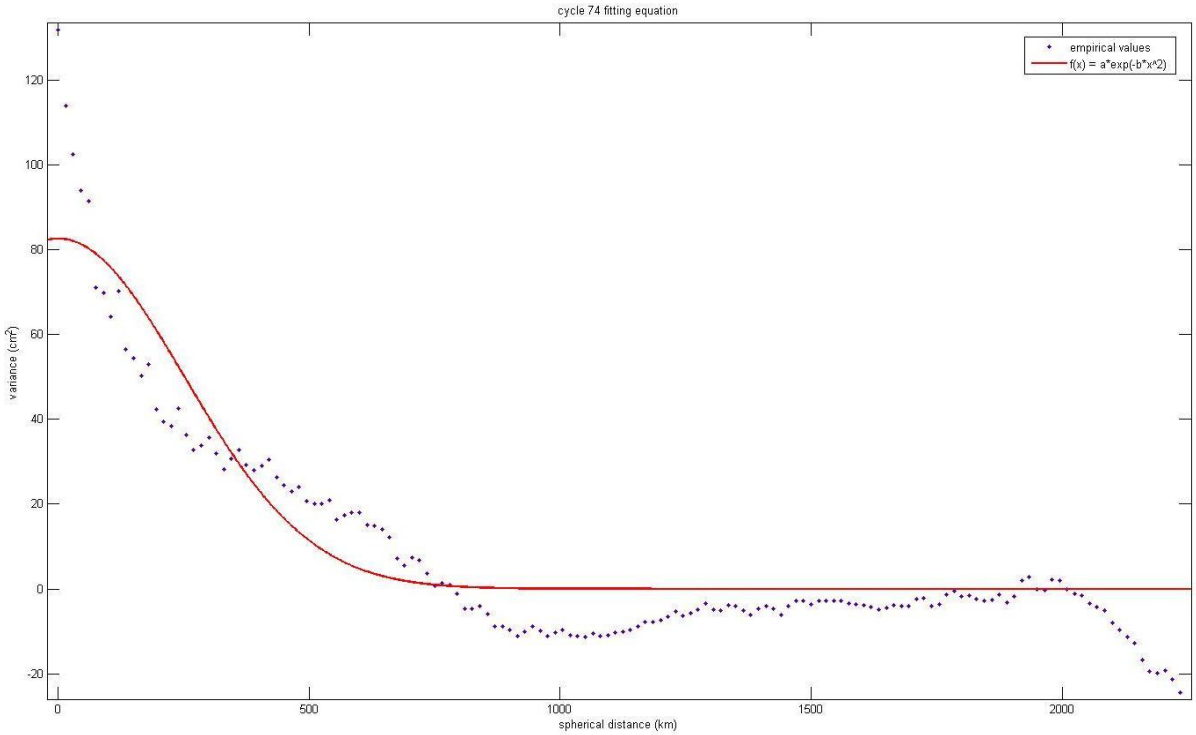
Σχήμα 4.136: Αναλυτική ΣΣ για τον κύκλο 74 με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi) = \alpha e^{b\psi}$



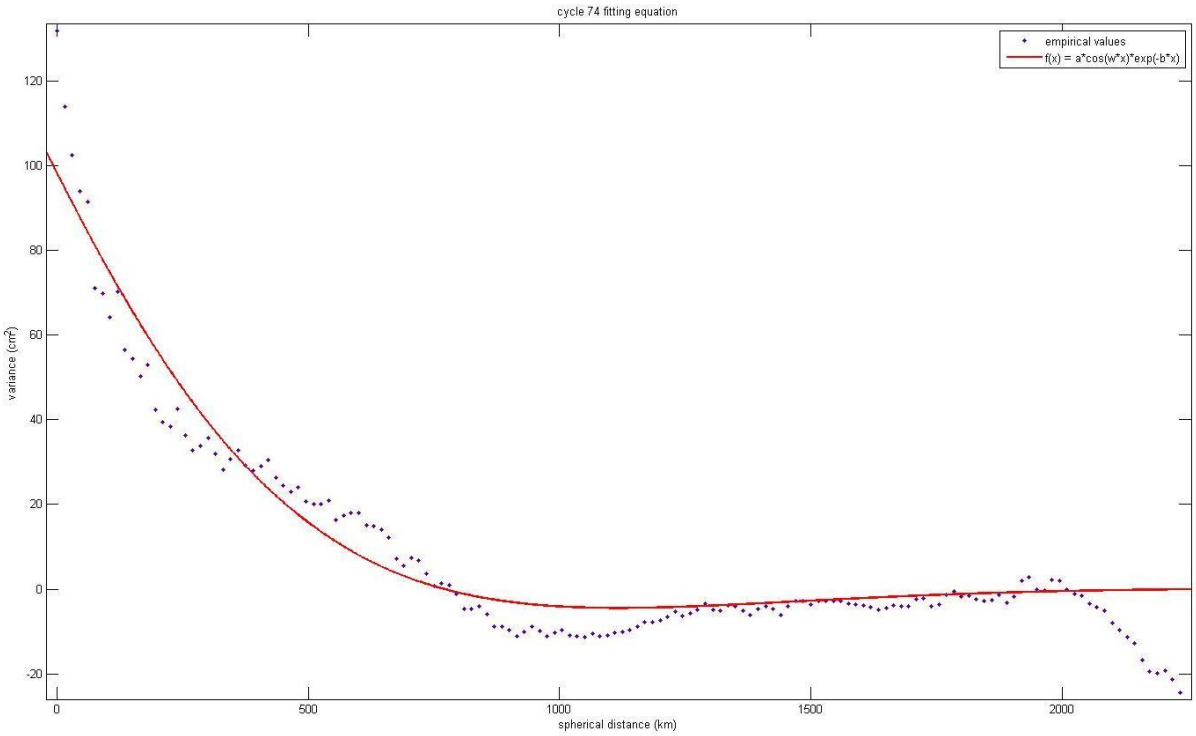
Σχήμα 4.137: Αναλυτική ΣΣ για τον κύκλο 74 με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi) = \alpha e^{b\psi} + ce^{d\psi}$



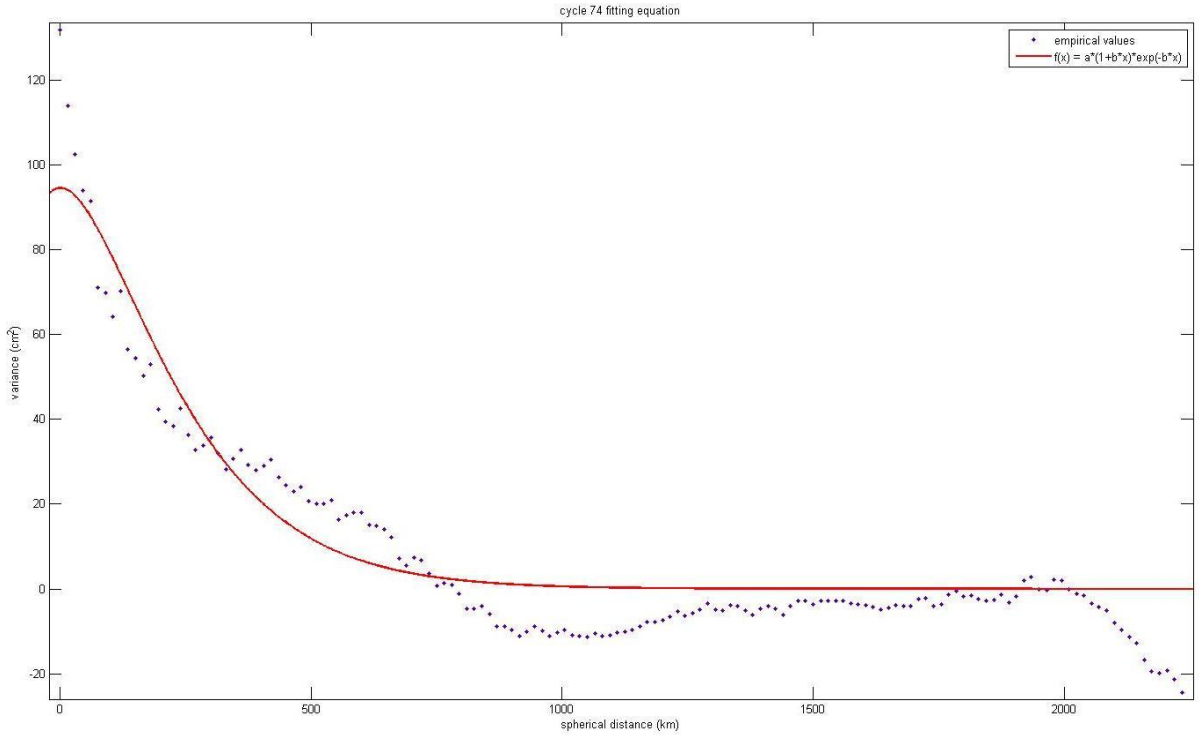
Σχήμα 4.138: Αναλυτική ΣΣ για τον κύκλο 74 με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi) = \alpha e^{(-(\frac{(\psi-b)}{c})^2)}$



Σχήμα 4.139: Αναλυτική ΣΣ για τον κύκλο 74 με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi) = \alpha e^{-b\psi^2}$



Σχήμα 4.140: Αναλυτική ΣΣ για τον κύκλο 74 με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi) = \alpha e^{-b\psi} \cos(\omega\psi)$



Σχήμα 4.141: Αναλυτική ΣΣ για τον κύκλο 74 με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi) = \alpha(1+b\psi)e^{-b\psi}$

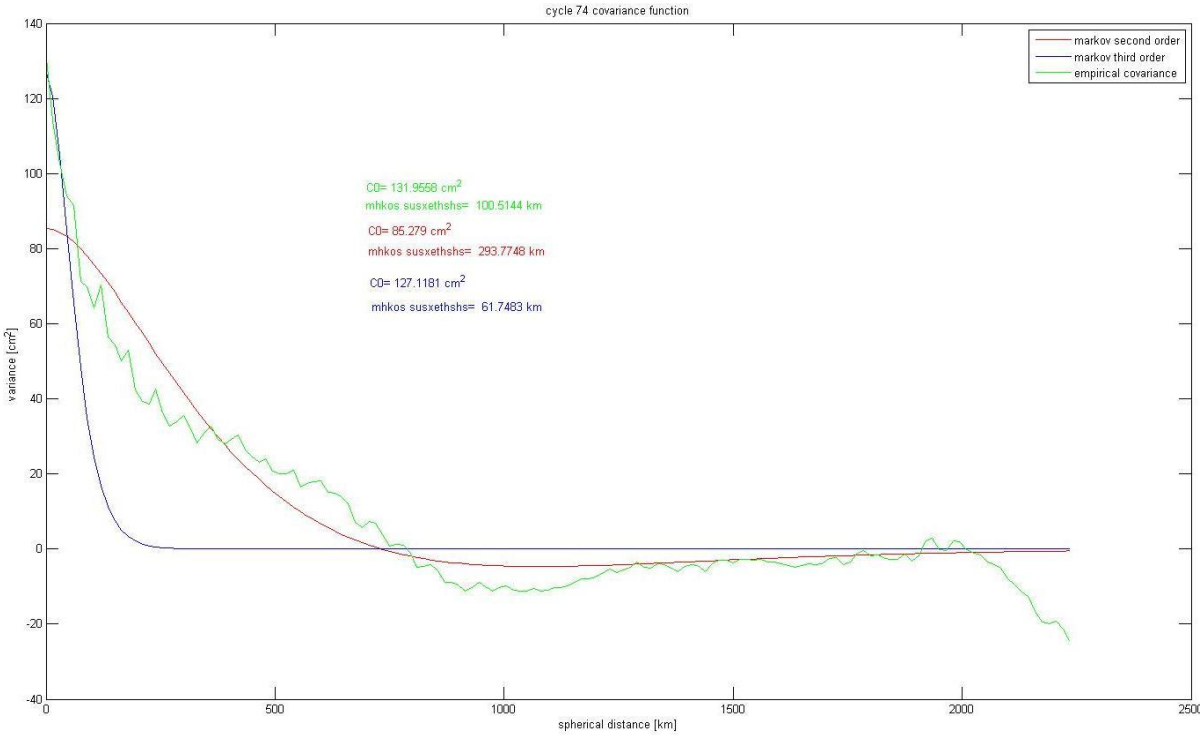
Πίνακας 4.9: Τιμές αγνώστων συντελεστών αναλυτικών εκθετικών μοντέλων για τον κύκλο 74

ΜΟΝΤΕΛΟ	1ο	2ο	3ο	4ο	5ο	6ο
a	125.1	133.3	4.12×10^{5}	96.39	115.8	107.4
b	-0.004	-0.003	-4085	9.79×10^{-6}	0.003	0.007
c		-13.07	1427			
d		-0.0005				
w					-0.002	

Οι παρατηρήσεις που κάναμε στην along track περίπτωση βλέπουμε πως ανταποκρίνονται και στην cross-track για τα δεδομένα του κύκλου 74. Το δεύτερο και πέμπτο μοντέλο προσαρμόζονται αρκετά καλά, ενώ τα υπόλοιπα μοντέλα παρουσιάζουν μικρότερες ή μεγαλύτερες αποκλίσεις από την εμπειρική συνάρτηση. Εντύπωση προκαλούν οι πολύ μεγάλες τιμές των συντελεστών στο τρίτο μοντέλο (μοντέλο Gaussian), οι οποίες παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση από την τιμή της μεταβλητότητας. Επίσης, βλέπουμε πως οι τιμές του συντελεστή *α* στις "καθαρά" εκθετικές τιμές πλησιάζει αρκετά στην τιμή της μεταβλητότητας (πρώτο και δεύτερο μοντέλο), ενώ στις συναρτήσεις που αποτελούν συνδυασμό εκθετικών συναρτήσεων με άλλες η τιμή του α είναι αρκετά μικρότερη. Το γεγονός αυτό αποτυπώνεται και στην απεικόνιση των συναρτήσεων, καθώς οι αναλυτικές εκθετικές ΣΣ έχουν μεγαλύτερη τιμή μεταβλητότητας. Τέλος, οι μεγάλες αποκλίσεις του τρίτου και τέταρτου μοντέλου μας οδήγησαν να τα

παραλείψουμε στην περίπτωση του παράθυρου δεδομένων, όπου τα τέσσερα από τα έξι μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία αναλυτικών ΣΣ.

Μοντέλα Gauss-Markov

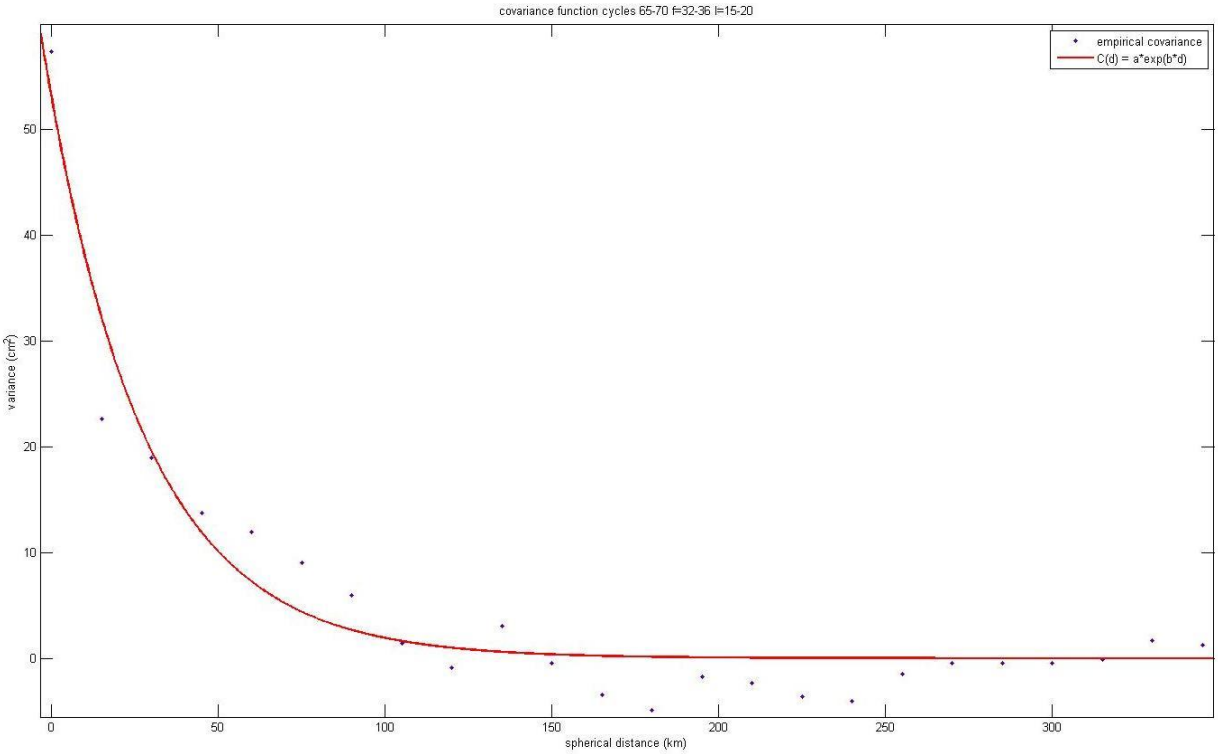


Σχήμα 4.142: Αναλυτική ΣΣ για τον κύκλο 74 με τα μοντέλα Gauss-Markov

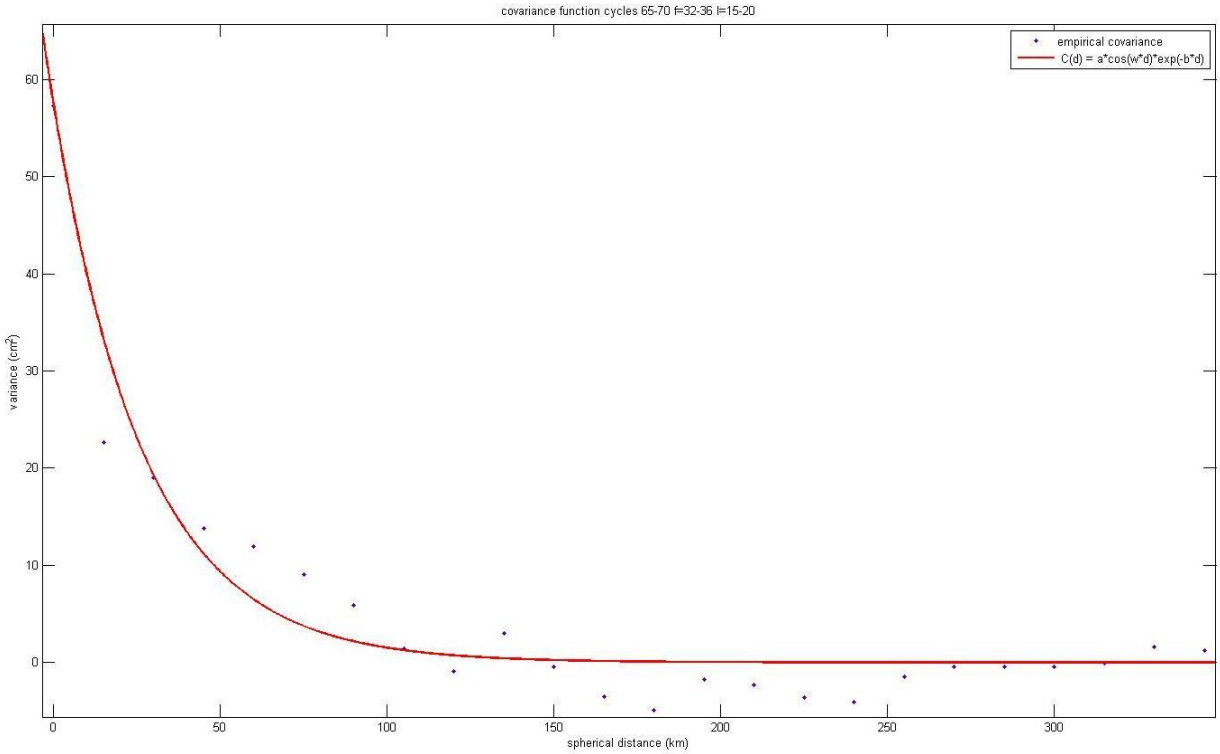
Τα μοντέλα Gauss-Markov όπως φαίνεται και από το παραπάνω Σχήμα δεν παρουσιάζουν καλή προσαρμογή στην εμπειρική ΣΣ. Το μοντέλο δευτέρου βαθμού έχει αρκετά μικρή τιμή μεταβλητότητας (~85 cm^2 έναντι ~132 cm^2 της εμπειρικής), ωστόσο η ομαλή μεταβολή του έχει ως αποτέλεσμα να προσεγγίζει ικανοποιητικά την εμπειρική στο μεγαλύτερο μήκος σχεδίασης. Αντίθετα, το μοντέλο τρίτου βαθμού αν και έχει μεταβλητότητα κοντά στην αντίστοιχη τιμή της εμπειρικής (~127 cm^2), η απότομη και γρήγορη μετάβασή του στο μηδέν έχει ως αποτέλεσμα μετά τα 100 km το μοντέλο να απέχει αρκετά από την εμπειρική και να προσεγγίζει στα μεγάλα μήκη μετά τα 1500 km μόνο στις τιμές της κοντά στο μηδέν..

Μελέτη αναλυτικών ΣΣ στο παράθυρο δεδομένων

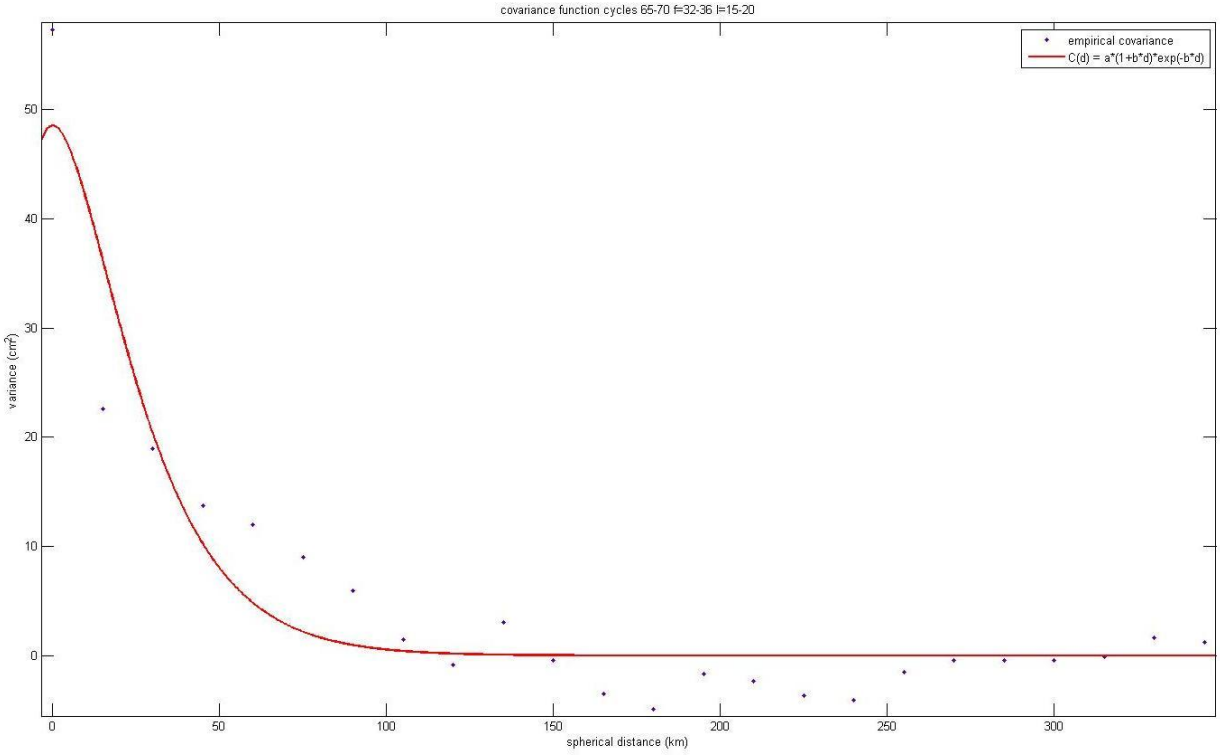
Όπως έχουμε αναφέρει, από τα έξι διαθέσιμα εκθετικά μοντέλα τέσσερα χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό αναλυτικών ΣΣ για την εμπειρική που προέκυψε από το παράθυρο δεδομένων. Αναλυτικές ΣΣ υπολογίστηκαν για το απλό εκθετικό μοντέλο, το άθροισμα των δύο εκθετικών, το γινόμενο μιας εκθετικής συνάρτησης με την τριγωνομετρική συνάρτηση και το τελευταίο μοντέλο (γινόμενο εκθετικής με ένα άθροισμα).



Σχήμα 4.143:Αναλυτική ΣΣ για το παράθυρο δεδομένων με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi) = \alpha e^{b\psi}$



Σχήμα 4.144: Αναλυτική ΣΣ για το παράθυρο δεδομένων με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi) = \alpha e^{-b\psi} \cos(\omega\psi)$



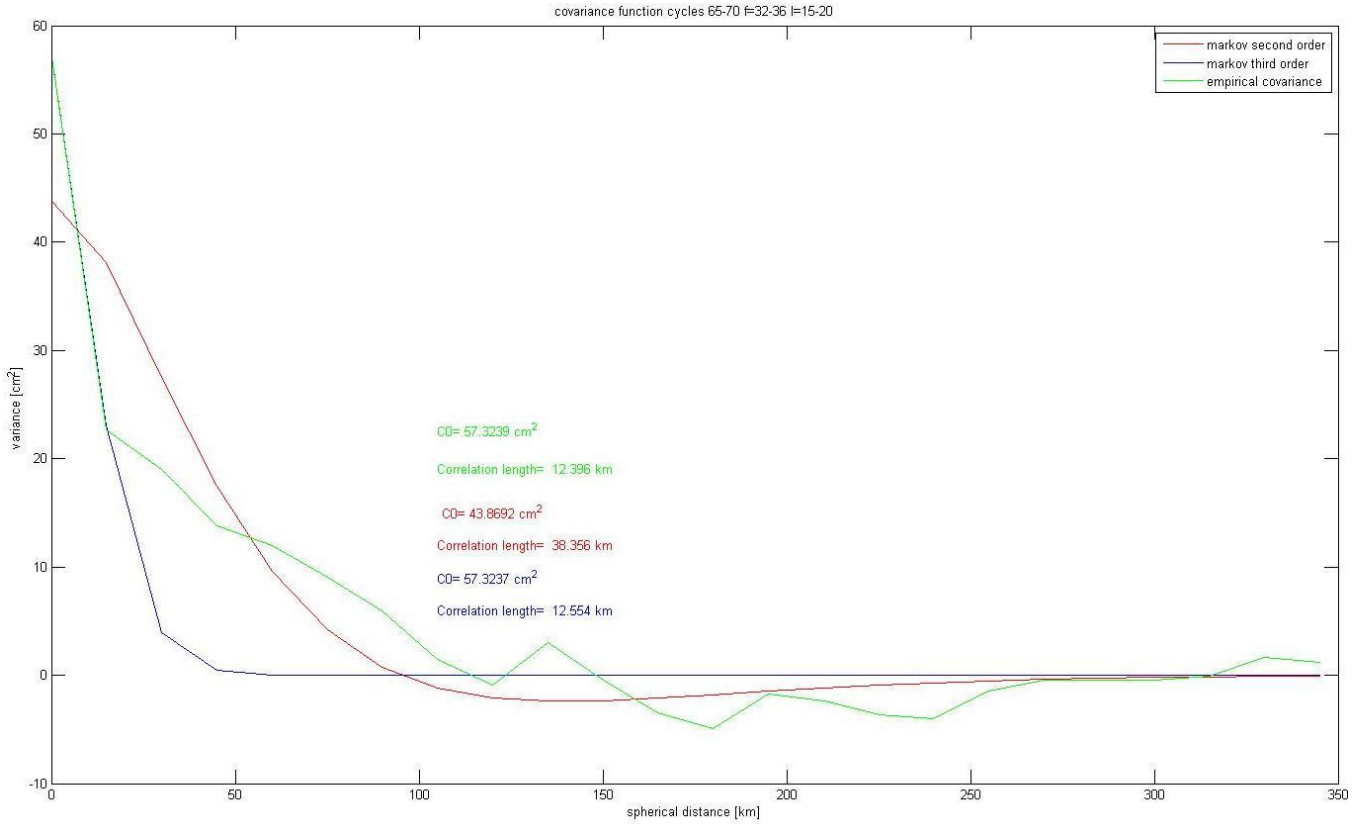
Σχήμα 4.145: Αναλυτική ΣΣ για το παράθυρο δεδομένων με το εκθετικό μοντέλο $C(\psi) = \alpha(1 + b\psi)e^{-b\psi}$

Πίνακας 4.10: Τιμές αγνώστων συντελεστών αναλυτικών εκθετικών μοντέλων για το παράθυρο δεδομένων

ΜΟΝΤΕΛΟ	**1ο**	**2ο**	**3ο**	**4ο**
a	52.9	53.11	57.35	48.54
b	-0.033	-0.031	0.036	0.065
c		-0.7301		
d		0.0006		
w			1.194×10^{-6}	

Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω σχήματα, το σύνολο των μοντέλων προσαρμόζεται αρκετά καλά στην εμπειρική ΣΣ. Το μικρό μέγιστο μήκος υπολογισμού και οι μικρές τιμές των μεταβλητοτήτων συντελούν στην ικανοποιητική προσαρμογή μεταξύ των δύο μοντέλων. Αντίθετα με τις προηγούμενες περιπτώσεις, το μοντέλο με την τριγωνομετρική συνάρτηση παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή μεταβλητότητας και την καλύτερη προσαρμογή.

Μοντέλα Gauss-Markov



Σχήμα 4.146:Αναλυτική ΣΣ για το παράθυρο δεδομένων με το μοντέλο Gauss-Markov

Αρχικά παρατηρούμε πως η τιμή της μεταβλητότητας του τρίτου μοντέλου είναι ίδια με την αντίστοιχη της εμπειρικής. Η μορφή των συναρτήσεων είναι κοινή μέχρι τα πρώτα 25 km, αλλά έπειτα η απότομη πτώση της τιμής του μοντέλου έχει ως αποτέλεσμα οι δύο συναρτήσεις να παρουσιάζουν καλή συμφωνία μετά τα 250 km. Ακόμη, το μοντέλο δευτέρου βαθμού παρουσιάζει και εδώ μικρότερη τιμή μεταβλητότητας από την αντίστοιχη εμπειρική(~43cm^2 έναντι~57cm^2). Ωστόσο, η πιο ομαλή μεταβολή του μοντέλου αυτού έχει ως αποτέλεσμα να προσεγγίζει την εμπειρική καλύτερα σε μεγαλύτερο τμήμα της συνάρτησης.

4.9 Πρόγνωση along track

Τελικός στόχος της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας ήταν η πρόγνωση τιμών μέσω της σημειακής προσαρμογής για να ελεγχθεί το σφάλμα της πρόγνωσης. Το σφάλμα αυτό θα αποτελέσει ένα μέτρο ελέγχου για το κατά πόσο θα μπορούσε αυτή η μέθοδος να χρησιμοποιηθεί για την πρόγνωση τιμών σε περιπτώσεις που δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα ή ακόμη και σε περιπτώσεις όπου λόγω διάφορων προβλημάτων παρουσιάζονταν κενά και ασυνέχειες στις εγγραφές των αλτιμετρικών παρατηρήσεων (ακτογραμμές, περιοχές με μικρή βάθη, νησιά, κ.λπ.). Η διαδικασία της πρόγνωσης ακολουθήθηκε στις περιπτώσεις που υπολογίστηκαν αναλυτικές ΣΣ. Στην along track περίπτωση εξετάστηκαν τρείς

διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη έγινε πρόγνωση στα πρώτα είκοσι σημεία έχοντας τα υπόλοιπα ως δεδομένα, στη δεύτερη στα είκοσι τελευταία, ενώ τέλος εξετάστηκε και η περίπτωση όπου πραγματοποιήθηκε πρόγνωση σε κάθε δεύτερο σημείο. Ο αλγόριθμος και η διαδικασία που ακολουθήθηκε έχουν παρουσιαστεί αναλυτικά σε προηγούμενα κεφάλαια και στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν μόνο τα αποτελέσματα των σφαλμάτων πρόγνωσης κάθε περίπτωσης με την αντίστοιχη ερμηνεία τους.

Πρόγνωση στα 20 πρώτα σημεία

Στην περίπτωση αυτή, έχοντας σαν δεδομένα τα υπόλοιπα σημεία του ίχνους της διάβασης πραγματοποιήσαμε πρόγνωση στα είκοσι πρώτα σημεία. Αρχικά, τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν θα κωδικοποιηθούν με κωδικές ονομασίες (π.χ. μοντέλο Α), έτσι ώστε να είναι πιο εύκολη η ανάγνωση, η παρακολούθηση και η μελέτη των αποτελεσμάτων.

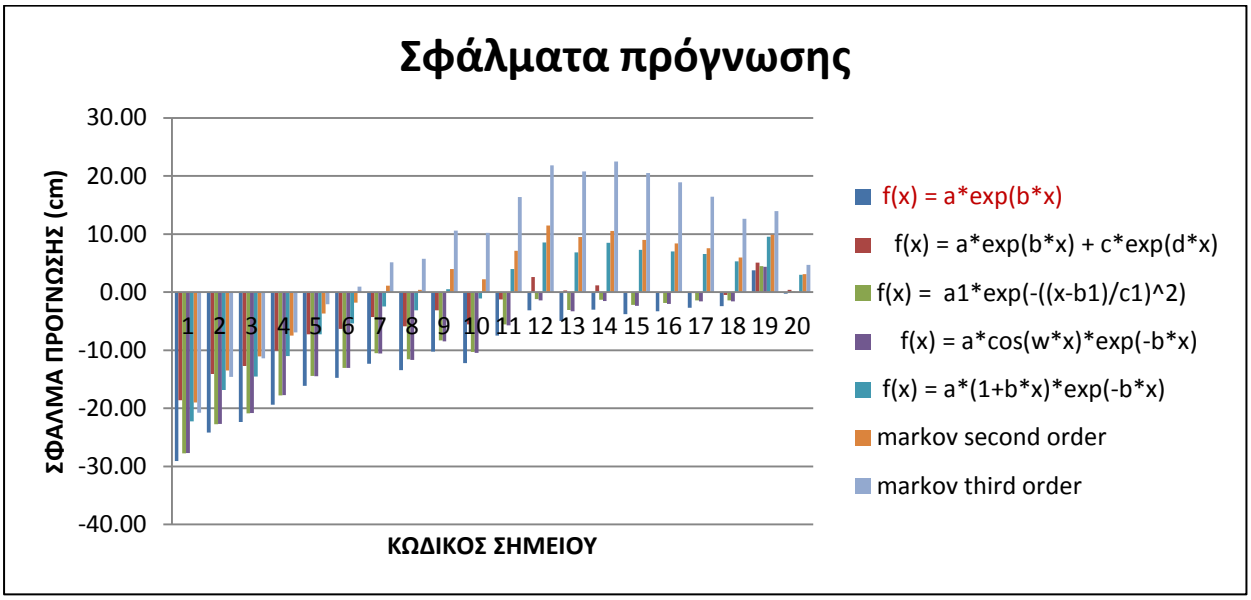
Πίνακας 4.11: Κωδικοποίηση της ονομασίας των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν

f(x) = a*exp(b*x)	Μοντέλο Α
f(x) = a*exp(b*x) + c*exp(d*x)	Μοντέλο Β
f(x) = a1*exp(-((x-b1)/c1)^2)	Μοντέλο Γ
f(x) = a*exp(-b*x^2)	Μοντέλο Δ
f(x) = a*cos(w*x)*exp(-b*x)	Μοντέλο Ε
f(x) = a*(1+b*x)*exp(-b*x)	Μοντέλο Ζ
markov second order	Μοντέλο Η
markov third order	Μοντέλο Θ
Legendre polynomials	Μοντέλο Ι

Στον Πίνακα 4.12 παρουσιάζονται τα στατιστικά των τιμών του σφάλματος πρόγνωσης που υπολογίστηκε για τα πρώτα είκοσι σημεία. Τα μοντέλα που παρουσίασαν μεγάλες τιμές σφαλμάτων αποκλείστηκαν και δεν εμφανίζονται στο Σχήμα (4.150) που παρουσιάζει γραφικά τις τιμές του σφάλματος κάθε σημείου.

Πίνακας 4.12: Στατιστικά σφαλμάτων πρόγνωσης στα είκοσι πρώτα σημεία (cm)

ΜΟΝΤΕΛΟ	**Α**	**Β**	**Γ**	**Δ**	**Ε**	**Ζ**	**Η**	**Θ**	**Ι**
min	-29.07	-18.60	-27.75	-9227331.85	-27.66	-22.22	-18.97	-20.76	-27032.55
max	3.74	5.07	4.46	-572.69	4.35	9.53	11.47	22.48	-27.03
mean	-10.06	-4.02	-8.53	-2140481.17	-8.63	-0.84	1.69	7.27	-7093.03
std	±8.87	±6.10	±8.75	±2829591.86	±8.67	±9.39	±8.70	±12.88	8255.70



Σχήμα 4.147: Απεικόνιση των σφαλμάτων πρόγνωσης στα είκοσι πρώτα σημεία

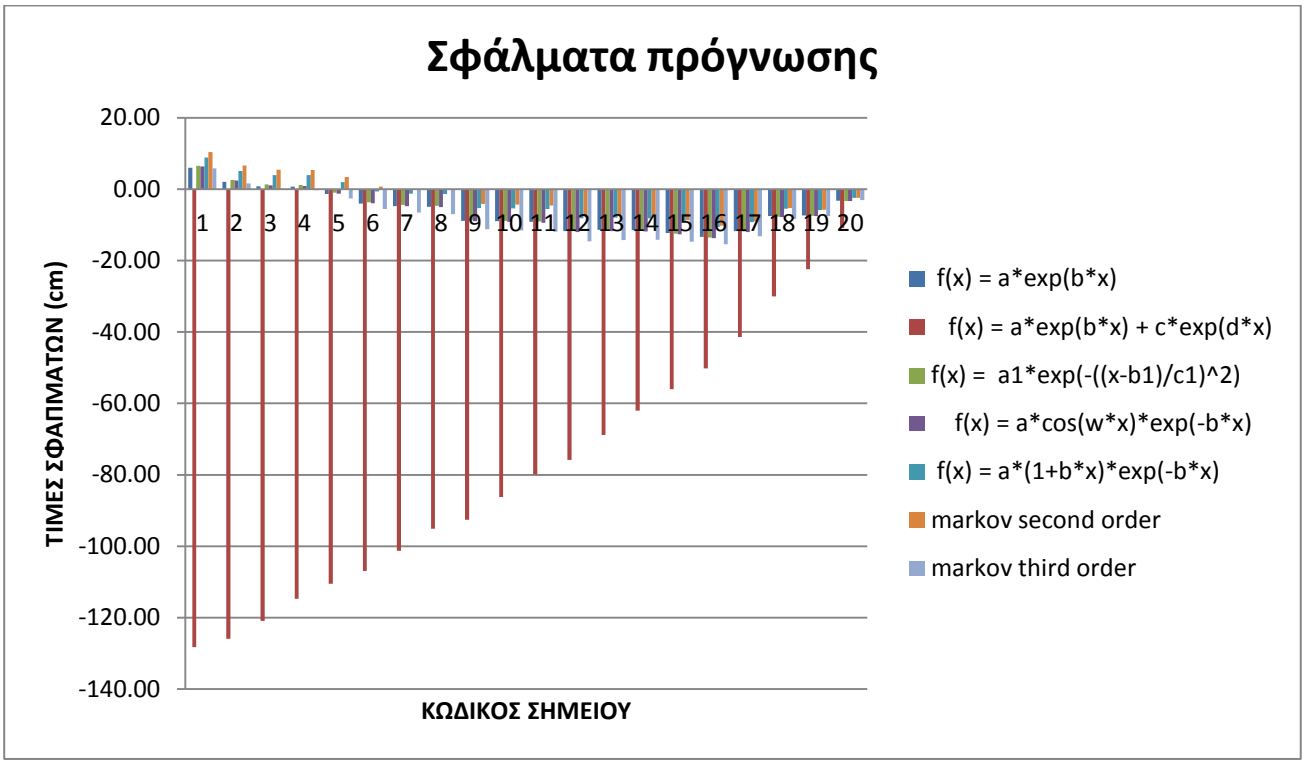
Από τον παραπάνω πίνακα και το Σχήμα 4.150 εύκολα διαπιστώνουμε πως οι τιμές των σφαλμάτων αυξάνονται όσο απομακρυνόμαστε από την περιοχή των δεδομένων. Ειδικότερα, τα σημεία με κωδικό >15 που είναι κοντά στα δεδομένα παρουσιάζουν τις μικρότερες τιμές σφαλμάτων ενώ τα σημεία με κωδικό μικρότερο <5 που είναι τα πλέον απομακρυσμένα παρουσιάζουν μια μέση τιμή του σφάλματος μεγαλύτερη των 10 cm σε απόλυτη τιμή. Σε ότι αφορά τα μοντέλα βλέπουμε πως το άθροισμα των εκθετικών συναρτήσεων (μοντέλο Β) παρουσιάζει τη μικρότερη τυπική απόκλιση (±6.1 cm) ενώ ακολουθούν το μοντέλο της τριγωνομετρικής εξίσωσης (μοντέλο Ε) με τυπική απόκλιση ±8.67 cm και το μοντέλο Markov δευτέρου βαθμού (μοντέλο Η) με ±8.70 cm. Ωστόσο, αν λάβουμε υπόψη τις ακραίες τιμές που παρουσιάζονται στα τρία μοντέλα βλέπουμε πως το μοντέλο Β αν και δεν παρουσιάζει τη μικρότερη μέση τιμή (-4.02 cm) έχει τις μικρότερες ακραίες τιμές. Τέλος, το μοντέλο των σφαιρικών αρμονικών και το μοντέλο Δ παρουσιάζουν απογοητευτικά αποτελέσματα. Αν και αναμέναμε πως αυτά τα δύο μοντέλα θα δώσουν σφάλματα μεγαλύτερα από τα υπόλοιπα με βάση τη μορφή των αναλυτικών ΣΣ που υπολογίστηκαν, εντούτοις σε καμία περίπτωση δεν αναμέναμε τόσο μεγάλες τιμές σφαλμάτων.

Πρόγνωση στα 20 τελευταία σημεία

Η περίπτωση αυτή είναι ανάλογη με την προηγούμενη, καθώς η μόνη αλλαγή έχει να κάνει με τη θέση των σημείων. Οι αποστάσεις από τα γνωστά σημεία είναι περίπου ίσες και είναι λογικό τα αποτελέσματα να παρουσιάζουν την ίδια περίπου συμπεριφορά.

Πίνακας 4.13: Στατιστικά σφαλμάτων πρόγνωσης στα είκοσι τελευταία σημεία (cm)

ΜΟΝΤΕΛΟ	Α	Β	Γ	Δ	Ε	Ζ	Η	Θ	Ι
min	-13.39	-128.22	-13.55	-3693901.76	-13.74	-10.57	-10.19	-15.40	22.36
max	5.95	-10.89	6.57	-239.25	6.38	8.86	10.42	5.79	57731.04
mean	-6.13	-78.97	-5.99	-824128.55	-6.23	-3.15	-2.24	-7.73	12734.09
std	±5.54	±35.41	±5.78	±1123449.33	±5.79	±5.54	±5.94	±6.31	±17043.66

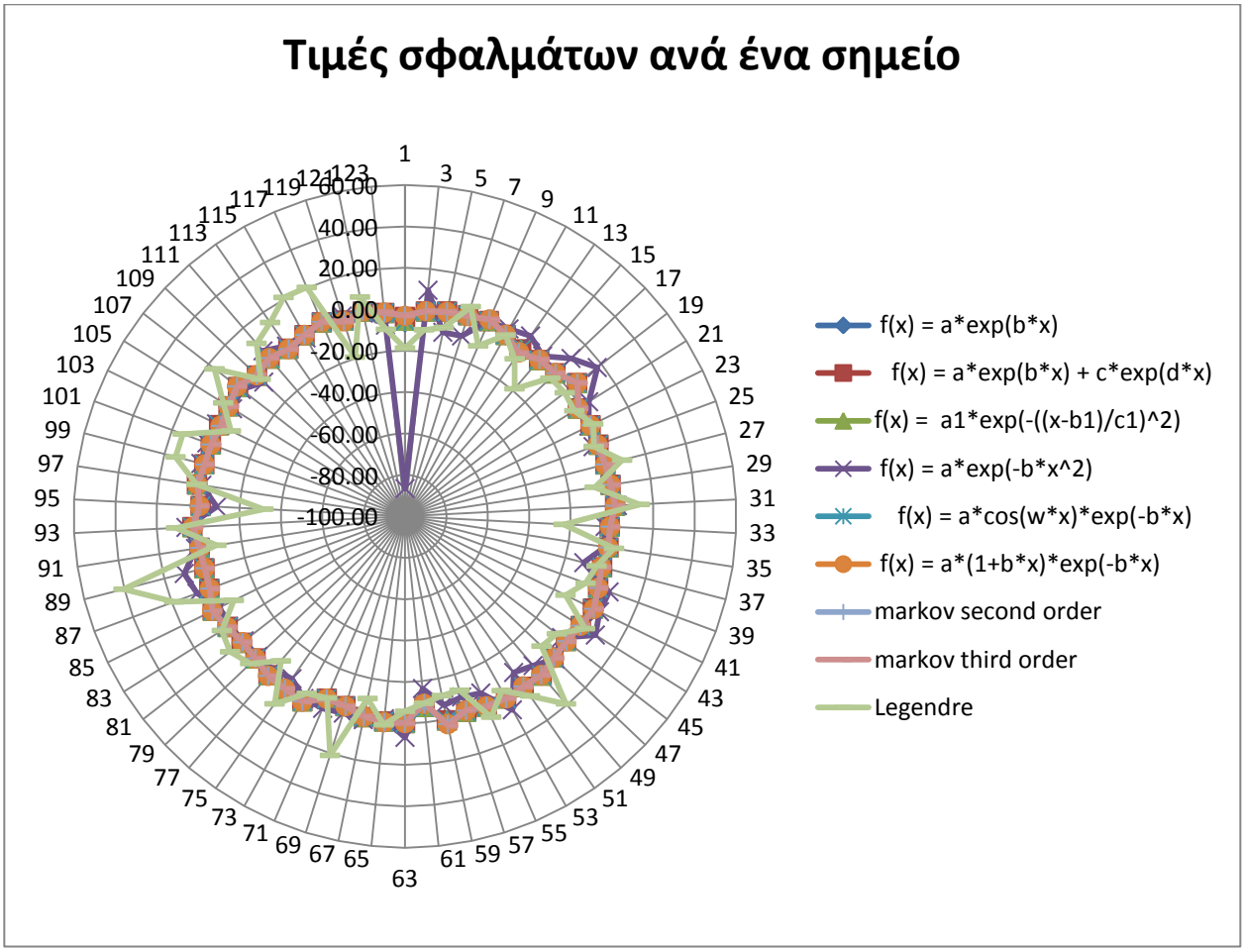


Σχήμα 4.148: Απεικόνιση των σφαλμάτων πρόγνωσης στα είκοσι τελευταία σημεία

Όπως ήδη αναφέραμε, τα σφάλματα σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με την προηγούμενη περίπτωση. Το μοντέλο Markov δευτέρου βαθμού καθώς και το τριγωνομετρικό μοντέλο έχουν και εδώ μικρή τυπική απόκλιση (±5.79 cm και ±5.94 cm αντίστοιχα) ενώ μικρές τυπικές αποκλίσεις παρουσιάζουν και τα μοντέλα Α, Γ, Ζ, και Θ. Ωστόσο πρέπει να καταγραφούν οι μεγάλες τιμές σφαλμάτων του μοντέλου Β (άθροισμα εκθετικών) που στην προηγούμενη περίπτωση εμφάνισε τις μικρότερες τιμές σφαλμάτων. Τέλος, και η τιμή της τυπικής απόκλισης όλων των μοντέλων είναι κατά μέσο όρο 2-3 cm μικρότερη από την προηγούμενη περίπτωση.

Πρόγνωση ανά ένα σημείο

Στην περίπτωση αύτη όλα τα μοντέλα έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Οι πολύ μικρές αποστάσεις μεταξύ των δεδομένων και των άγνωστων σημείων είχε ως αποτέλεσμα τις μικρές τιμές των σφαλμάτων. Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός, πως τόσο το μοντέλο σφαιρικών αρμονικών όσο και το μοντέλο Δ που μέχρι στιγμής είχαν δώσει απογοητευτικά αποτελέσματα, στην περίπτωση αυτή εμφάνισαν αποτελέσματα με τυπική απόκλιση ~±12.5 cm ενώ όλα τα υπόλοιπα εμφανίζουν τυπική απόκλιση ~±2 cm (Πίνακας 4.13).



Σχήμα 4.149: Απεικόνιση των σφαλμάτων πρόγνωσης ανά ένα σημείο

Πίνακας 4.14: Στατιστικά σφαλμάτων πρόγνωσης ανά ένα σημείο (cm)

ΜΟΝΤΕΛΟ	Α	Β	Γ	Δ	Ε	Ζ	Η	Θ	Ι
min	-7.61	-7.57	-7.52	-86.59	-7.55	-8.98	-9.00	-9.94	-31.58
max	5.08	5.10	5.09	17.39	5.09	5.27	5.27	5.29	40.37
mean	-0.11	-0.06	-0.10	-1.43	-0.10	-0.08	-0.07	-0.08	-0.08
stdev	±1.99	±1.88	±1.95	±12.47	±1.95	±2.07	±2.07	±2.18	±12.58

4.10 Πρόγνωση cross-track

Στην cross track περίπτωση εξετάστηκε μόνο η πρόγνωση ανά ένα σημείο. Τόσο στην περίπτωση του συνόλου δεδομένων για τον κύκλο 74 όσο και σε αυτήν του παράθυρου δεδομένων υπολογίστηκαν σφάλματα πρόγνωσης με τα έξι μοντέλα (τέσσερα εκθετικά και τα δύο μοντέλα του Markov) με τα οποία είχαν δημιουργηθεί αναλυτικές ΣΣ για τα αντίστοιχα δεδομένα. Όπως και παραπάνω, τα αποτελέσματα θα αναφερθούν με τους ίδιους κωδικούς που χρησιμοποιήθηκαν και στην along track περίπτωση.

Κύκλος 74

Πίνακας 4.15: Στατιστικά σφαλμάτων πρόγνωσης ανά ένα σημείο (cm)

ΜΟΝΤΕΛΟ	**Α**	**Β**	**Ε**	**Ζ**	**Η**	**Θ**
min	-34.88	-34.88	-34.89	-47.95	-47.97	-80.37
max	29.31	29.37	29.39	55.15	55.18	89.49
mean	-0.03	-0.03	-0.03	-0.02	-0.02	-0.02
stdev	±3.65	±3.65	±3.65	±4.57	±4.57	±5.77

Από τον Πίνακα 4.14 παρατηρούμε πως οι διαφορές που παρουσιάζονται μεταξύ των τριών πρώτων εκθετικών μοντέλων είναι πολύ μικρές. Είναι χαρακτηριστικό πως παρουσιάζουν τα ίδια στατιστικά χαρακτηριστικά με κάποιες διαφορές να εμφανίζονταιι μόνο στο μέγεθος της μέγιστης τιμής. Αντίστοιχα, πολύ μικρές είναι και οι διαφορές που εμφανίζονται μεταξύ του μοντέλου Z και του μοντέλου Markov δεύτερης τάξης, ενώ για ακόμη μία φορά το μοντέλο Markov τρίτης τάξης δίνει τα χειρότερα αποτελέσματα. Ειδικότερα, στην περίπτωση του κύκλου 74, παρατηρήθηκαν ικανοποιητικές τιμές σφαλμάτων πρόγνωσης. Είναι χαρακτηριστικό πως η τυπική απόκλιση της πλειοψηφίας των μοντέλων είναι καλύτερη των ±5 cm. Οι σχετικά μεγάλες ακραίες τιμές που παρατηρήθηκαν αφορούν μεμονωμένες τιμές που βρίσκονται μακριά από τα δεδομένα. Ωστόσο, οι τιμές αυτές είναι αρκετά μεγάλες στην περίπτωση του μοντέλου Markov τρίτης τάξης και ως εκ τούτου το μοντέλο αυτό δεν είναι κατάλληλο για πρόγνωση στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Θα πρέπει να μπει κάποιο Σχήμα από matlab με τα σφάλματα ανά σημείο πρόγνωσης, είτε με μικρούς κύκλους και χρώμα είτε κάνε πρόγνωση για να βγει μια επιφάνεια.

Παράθυρο δεδομένων

Πίνακας 4.16: Στατιστικά σφαλμάτων πρόγνωσης ανά ένα σημείο (cm)

ΜΟΝΤΕΛΟ	Α	Β	Ε	Ζ	Η	Θ
min	-30.91	-30.91	-30.91	-400.91	-403.55	-1817.24
max	29.50	29.50	29.50	223.42	234.22	1385.80
mean	0.19	0.19	0.19	1.03	1.08	6.45
stdev	±7.40	±7.40	±7.40	±33.94	±34.63	±167.20

Αντίθετα με την προηγούμενη cross-track περίπτωση, στο παράθυρο δεδομένων βλέπουμε πως οι τιμές των σφαλμάτων είναι πολύ μεγαλύτερες. Μόνο τα τρία πρώτα μοντέλα δίνουν τυπική απόκλιση < ±10 cm ενώ τα άλλα δύο σφάλματα της τάξης ±35 cm και το μοντέλο Markov τρίτης τάξης > ±1.5 m! Τα αποτελέσματα αυτά δεν ήταν αναμενόμενα καθώς τόσο για τον κύκλο 74 όσο και για την πρόγνωση ανά ένα σημείο στην along track περίπτωση παρατηρήθηκαν χαμηλές τιμές σφαλμάτων.

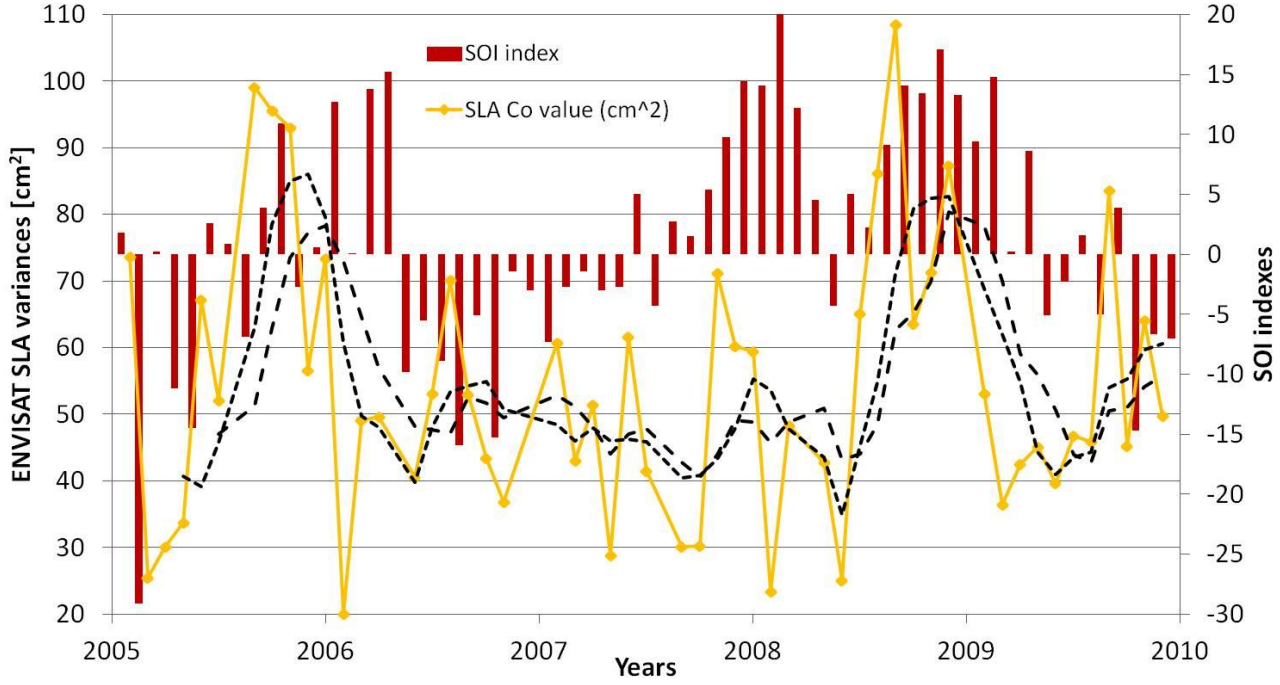
4.11 Συσχέτιση μεταξύ τιμών SLA και τιμών SOI, MOI και NAO

Τέλος, μελετήθηκαν πιθανοί συσχετισμοί μεταξύ των μεταβολών των τιμών της SLA και τοπικών ή παγκοσμίων κλιματικών φαινομένων τα οποία επηρεάζουν την ωκεάνια κατάσταση. Ειδικότερα, εξετάστηκαν τρεις μετεωρολογικοί δείκτες. Ο πρώτος σχετικός δείκτης είναι γνωστός σαν SOI (Southern Oscillation Index, Δείκτης Νότιας Ταλάντωσης) και δείχνει την αντίδραση των ωκεανών στα φαινόμενα El Niño/La Niña. Ουσιαστικά, αποτελεί ένα δείκτη της έντασης και της ανάπτυξης των αντίστοιχων φαινομένων στον Ειρηνικό Ωκεανό. Υπολογίζεται χρησιμοποιώντας διαφορές της πίεσης μεταξύ της Ταϊτής και της Δαρβίνειας. Αρνητικές τιμές υποδεικνύουν φαινόμενα El Niño με θερμότερα νερά στις ανατολικότερες τροπικές χώρες ενώ θετικές τιμές φανερώνουν φαινόμενα La Niña με ψυχρότερα νερά στις αντίστοιχες χώρες (Allan et al. 1991, Können 1998, Ropelewski et al. 1987). Για τον δείκτη αυτόν χρησιμοποιήθηκαν τιμές από το Australian Government Bureau of Meteorology (Γραφείο Μετεωρολογίας της Αυστραλίας) (http://www.bom.gov.au/).

Ο επόμενος δείκτης NAO (North Atlantic Oscillation, Δείκτης Ταλάντωσης στο Βόρειο Ατλαντικό) δείχνει τις μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης στο επίπεδο της θάλασσας μεταξύ Ισλανδίας και Αζορών. Ελέγχει τη μεταβολή του χειμερινού κλίματος στο Βόρειο Ατλαντικό μεταξύ των κεντρικών χωρών της Βόρειας Αμερικής και Ευρώπης. Θετικές τιμές του NAO έχουν ως αποτέλεσμα θερμούς-υγρούς χειμώνες στην Ευρώπη, ξηρούς στη Μεσόγειο και κρύους-ξηρούς χειμώνες στο Βόρειο Καναδά και Γροιλανδία. Αντίθετα, αρνητικές τιμές του NAO φέρνουν υγρό αέρα στη Μεσόγειο και παγωμένο στη Βόρεια Ευρώπη(Tsimplis amd Josey 2001, Osborn 2006, 2011, Wakelin et al. 2003, Woolf et al. 2003).

Ο τελευταίος δείκτης, MOI (Mediterranean Oscillation Index, Δείκτης Ταλάντωσης στη Μεσόγειο) αναφέρεται στις διακυμάνσεις των διαφορών της ατμοσφαιρικής πίεσης στο επίπεδο της θάλασσας μεταξύ Αλγερίου και Κάιρου. Είναι ένας δείκτης της κλιματικής μεταβολής στη Μεσόγειο καθώς θετικές τιμές έχουν ως αποτέλεσμα ξηρούς χειμώνες σε όλη τη Μεσόγειο πλην του βορειοανατολικού τμήματος. Αντίθετα, αρνητικές τιμές προκαλούν κυκλώνες στη Δυτική Μεσόγειο και ασυνήθιστους υγρούς χειμώνες πλην του βορειοανατολικού τμήματος (Palutikof 2003, Tsimplis and Shaw 2006, Supic et al. 2004, Sušelj and Bergant 2006). Για τον δείκτη αυτόν χρησιμοποιήθηκαν τιμές από τον τομέα έρευνας του κλίματος του Πανεπιστημίου της Ανατολικής Αγγλίας (http://www.cru.uea.ac.uk/).

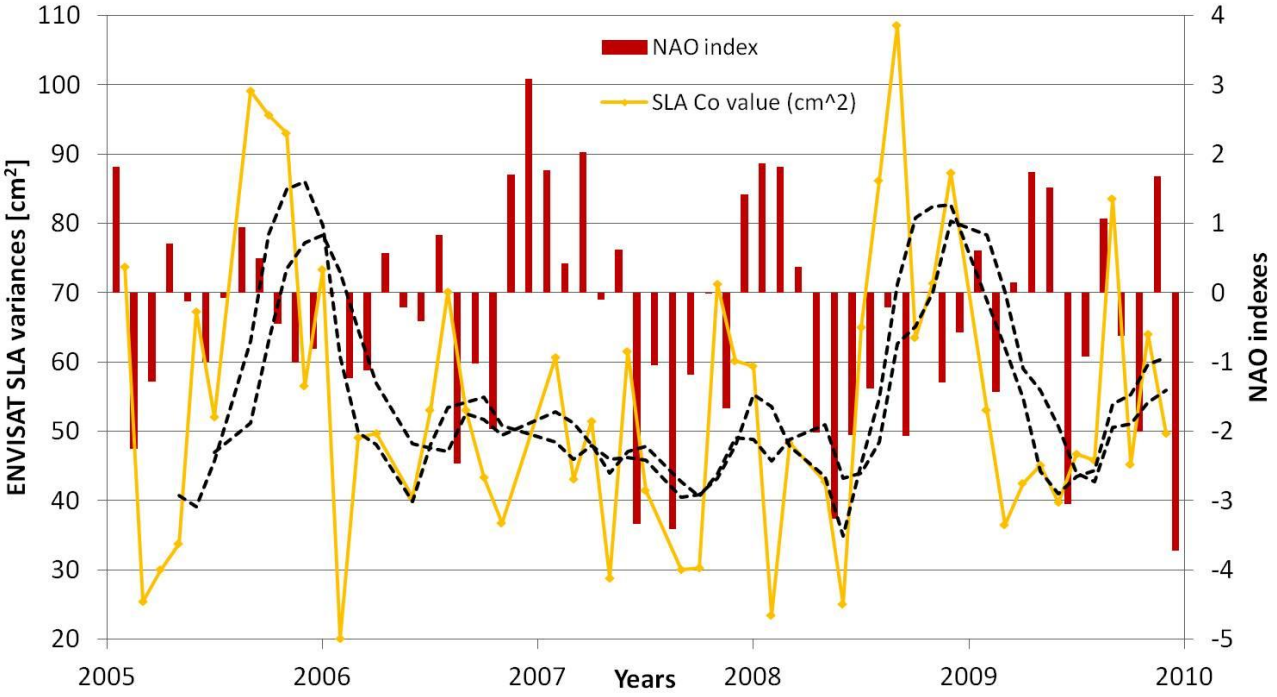
Προκειμένου να αναλυθούν πιθανοί συσχετισμοί, οι τιμές των μεταβλητοτήτων της διάβασης 444 του Envisat συγκρίθηκαν για την περίοδο 2005-2010 με τις τιμές των δεικτών SOI, MOI και NAO. Το Σχήμα 4.152 απεικονίζει τις μεταβλητότητες της SLA για την περίοδο μελέτης καθώς και τους δείκτες SOI για το ίδιο διάστημα. Από την μελέτη του Σχήματος συμπεραίνεται συσχέτιση αν και αυτή παρουσιάζεται με χρονική καθυστέρηση τεσσάρων μηνών. Οι μεγάλες αρνητικές τιμές στην αρχή του 2005 (Φεβρουάριος) έχουν ως αποτέλεσμα τις υψηλές τιμές των μεταβλητοτήτων τον Ιούλιο 2005. Η εμφάνιση του El Niño το Μάρτιο του 2006 επηρεάζει πιο γρήγορα την τιμή της SLA, με μια σημαντική αύξηση να παρατηρείται τον Ιούνιο και τον Ιούλιο. Η ίδια συμπεριφορά είναι εμφανής και για φαινόμενα La Niña. Υψηλές τιμές στα τέλη του 2007 και τις αρχές του 2008, στα τέλη του 2008 και τις αρχές του 2009, επιφέρουν σημαντική μείωση στη μεταβλητότητα της SLA με την εμφάνιση των χαμηλότερων τιμών τον Απρίλιο του 2008 και το Φεβρουάριο 2009 (με καθυστέρηση τεσσάρων μηνών).



Σχήμα 4.150: Μεταβλητότητα της SLA για το διάστημα 2005-2010 και η συσχέτιση με το SOI

Δεδομένου ότι τα φαινόμενα El Niño και La Niña μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικά για τη Μεσόγειο λόγω της απόστασής τους από αυτήν και το χαρακτηριστικό της τελευταίας ως κλειστής θάλασσας, ο δείκτης NAO ίσως θα ήταν προτιμότερο να εξεταστεί ως πιθανή συσχέτιση μεταξύ ατμοσφαιρικής πίεσης και μεταβολών στην τιμή της SLA. Το Σχήμα 4.153 απεικονίζει τις μεταβολές της SLA

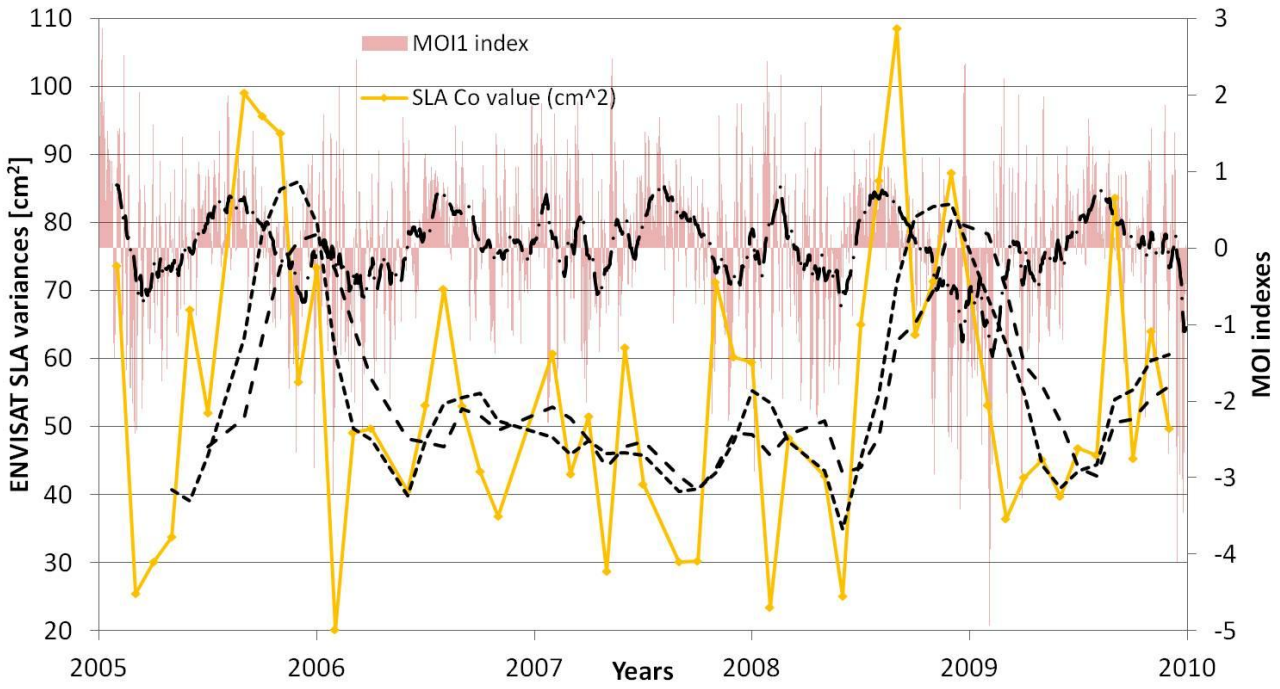
για το διάστημα μελέτης μαζί με τις τιμές του δείκτη NAO για το ίδιο διάστημα. Είναι εμφανές πως υπάρχει μια ισχυρή συσχέτιση, καθώς θετικές τιμές του δείκτη NAO επιφέρουν άμεσες πιέσεις στη στάθμη της θάλασσας στη Μεσόγειο, ενώ αρνητικές τιμές προκαλούν άνοδο της στάθμης. Είναι χαρακτηριστικό πως οι μεγάλες θετικές τιμές του NAO επιφέρουν άμεσα πτώση της στάθμης της θάλασσας σε διάστημα λιγότερο του ενός μηνός. Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται για όλους τους χειμερινούς μήνες, αντίθετα με τους θερινούς όπου η αντίδραση της στάθμης της θάλασσας στις μεταβολές του NAO δεν απεικονίζεται τόσο καλά. Το γεγονός αυτό, συμφωνεί με τα αποτελέσματα ερευνών άλλων εργασιών (π.χ. Tsimplis and Shaw 2008), τα οποία έδειξαν πως η ατμοσφαιρική πίεση δεν είναι ένας παράγοντας που συνεισφέρει στις μεταβολές της στάθμης της Μεσογείου κατά την καλοκαιρινή περίοδο.



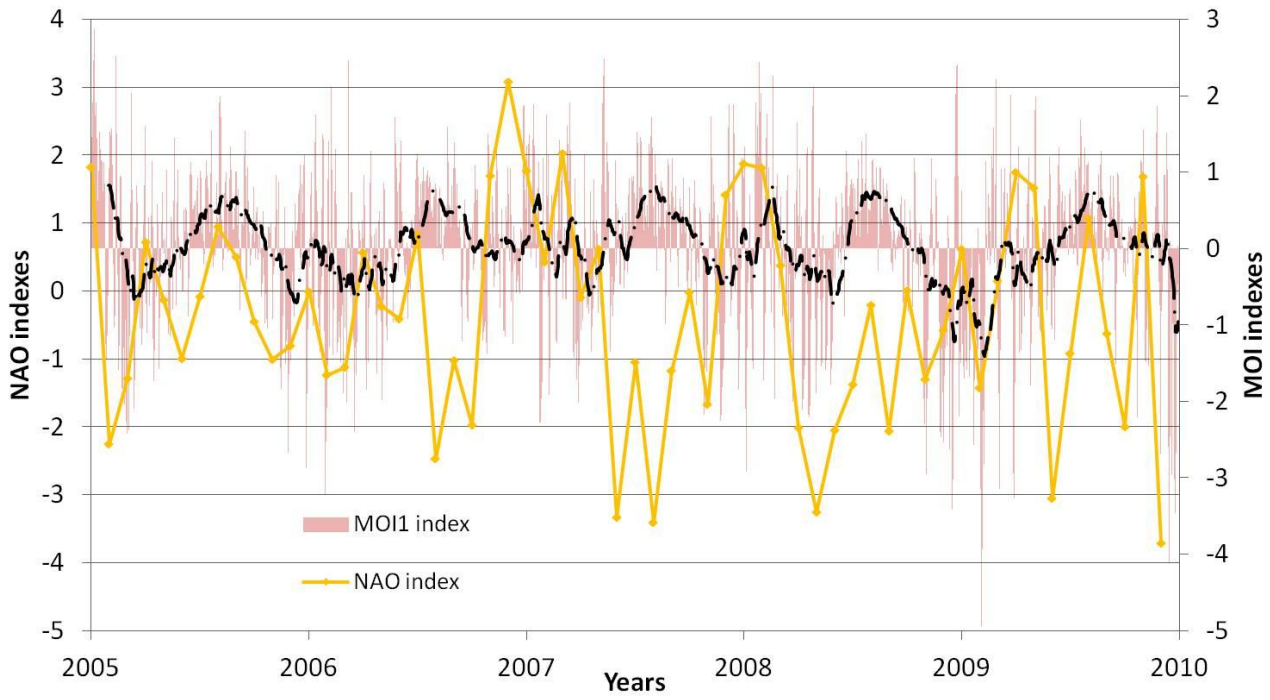
Σχήμα 4.151: Μεταβλητότητα της SLA για το διάστημα 2005-2010 και η συσχέτιση με το NAO

Τέλος, εξετάστηκε και η συσχέτιση του δείκτη MOI, καθώς αποτελεί την καταλληλότερη μέτρηση για τη επίδραση της ατμοσφαιρικής πίεσης στη στάθμη της Μεσογείου. Το Σχήμα 4.154 απεικονίζει τις τιμές του δείκτη MOI και τις αντίστοιχες της SLA για το ίδιο χρονικό διάστημα. Προκειμένου να είναι πιο εύκολη η μελέτη και η σύγκριση των δύο τιμών καθώς οι τιμές του δείκτη MOI είναι διαθέσιμες ως ημερήσιες τιμές, ένας μέσος όρος των 30 ημερών απεικονίζεται στο ίδιο Σχήμα. Από το Σχήμα είναι εμφανές πως θετικές τιμές του MOI επιφέρουν πτώση της SLA λόγω των ξηρών συνθηκών (Ιούλιος του 2007 και Φεβρουάριος του 2009). Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται και για τις αρνητικές τιμές, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την άνοδο της θαλάσσιας στάθμης (π.χ. αρχές του 2005 και Σεπτέμβριος του 2007). Ορισμένες πολύ μεγάλες τάσεις στην τιμή της SLA δεν οφείλονται αποκλειστικά στις τιμές του MOI, καθώς για παράδειγμα τον Αύγουστο του 2008 θετικές τιμές του MOI παρατηρούνται ταυτόχρονα με υψηλότερες τιμές της SLA. Αντίθετα, την ίδια περίοδο ο δείκτης NAO παρουσιάζει μια αρνητική τιμή ιδιαίτερα χαμηλή, απεικονίζοντας έτσι την αμοιβαία αλληλεπίδραση μεταξύ της ωκεάνιας κυκλοφορίας στον Ατλαντικό και των μεταβολών της στάθμης της θάλασσας στη Μεσόγειο. Αυτή η «μη-συσχέτιση» μεταξύ των δεικτών NAO και MOI το καλοκαίρι του 2008 φαίνεται και από το Σχήμα 4.155, όπου οι δύο δείκτες απεικονίζονται

ταυτόχρονα. Αν και στις περισσότερες περιπτώσεις οι δύο δείκτες είναι συσχετισμένοι και ο ένας ακολουθεί τον άλλο, ειδικά κατά τη διάρκεια του χειμώνα και του φθινοπώρου, η ασυμφωνία τους την άνοιξη και το καλοκαίρι, αποδεικνύει πως οι ατμοσφαιρικές συνθήκες στο Βόρειο Ατλαντικό δεν αποτελούν τον κύριο παράγοντα που επηρεάζει την κατάσταση στη Μεσόγειο Θάλασσα.



Σχήμα 4.152: Μεταβλητότητα της SLA για το διάστημα 2005-2010 και η συσχέτιση με το MOI



Σχήμα 4.153: Δείκτες NAO και MOI για το διάστημα 2005-2010

4.12 Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάστηκαν αναλυτικά τα αριθμητικά αποτελέσματα της μεταπτυχιακής εργασίας. Εξετάστηκαν με λεπτομέρεια οι διακυμάνσεις στην τιμή της SLA για τη δορυφορική διάβαση 444 το χρονικό διάστημα 2005-2010 και παρουσιάστηκαν όλες οι εμπειρικές ΣΣ για την ίδια διάβαση το ίδιο χρονικό διάστημα. Ταυτόχρονα, απεικονίστηκαν οι εμπειρικές ΣΣ για όλους τους κύκλους ενός έτους, η ΣΣ για τη δυναμική θαλάσσια τοπογραφία του μοντέλου της Rio αλλά και για το παράθυρο δεδομένων που δημιουργήσαμε. Έγινε παρουσίαση των αναλυτικών ΣΣ που υπολογίστηκαν για την along track περίπτωση αλλά και για την αντίστοιχη της cross track. Ειδικότερα, παρατέθηκαν οι αναλυτικές ΣΣ για τη διάβαση 444 του Αύγουστου 2005 αλλά και οι αντίστοιχες για τον κύκλο 74 και το παράθυρο δεδομένων. Σημαντική αναφορά γίνεται και στην πρόγνωση τιμών με τη μέθοδο της σημειακής προσαρμογής. Εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις για την along track περίπτωση (πρόγνωση στα 20 πρώτα σημεία, πρόγνωση στα 20 τελευταία και πρόγνωση σε κάθε δεύτερο σημείο), ενώ στην cross track περίπτωση εξετάστηκε μόνο η πρόγνωση σε κάθε δεύτερο σημείο. Το κεφάλαιο κλείνει με την παρουσίαση των τιμών των μετεωρολογικών δεικτών SOI, MOI και NAO και την πιθανή συσχέτιση μεταξύ των τιμών των δεικτών αυτών και της τιμής των μεταβλητοτήτων της SLA.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή επιχειρήθηκε μία συνολική μελέτη των μεταβολών της ανωμαλίας της θαλάσσιας επιφάνειας στο χώρο της Μεσογείου από δεδομένα της δορυφορικής αποστολής του Envisat, της στατιστικής τους συμπεριφοράς και της δημιουργίας των αντίστοιχων ΣΣ. Αρχικά, παρουσιάστηκαν βασικές αρχές και έννοιες που αφορούν τη δορυφορική αλτιμετρία για να ακολουθήσει μια σύντομη ανάλυση των δορυφορικών αποστολών του παρελθόντος. Ειδική αναφορά έγινε στη δορυφορική αποστολή του Envisat, στις διάφορες ανωμαλίες της θαλάσσιας επιφάνειας καθώς στη δυναμική θαλάσσια τοπογραφία. Επιπλέον, έγινε ανάλυση των ΣΣ. Περιγράφηκε η μορφή τους, ο τρόπος υπολογισμού τους και τα χαρακτηριστικά τους μεγέθη. Παρουσιάστηκε η εμπειρική ΣΣ και τα διάφορα αναλυτικά μοντέλα που θα χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία και τον υπολογισμό των αντίστοιχων αναλυτικών συναρτήσεων. Αναλύθηκε διεξοδικά ο αλγόριθμος της σημειακής προσαρμογής για την πρόγνωση τιμών καθώς και η μορφή των διαθέσιμων δεδομένων της αποστολής του Envisat που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή. Εκτενής αναφορά έγινε στο στάδιο προεπεξεργασίας των δεδομένων. Παρουσιάστηκε η επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων και οι δύο εναλλακτικές περιπτώσεις που εξετάστηκαν, η along track για τη μία διάσταση και η cross-track για τη περίπτωση των δύο διαστάσεων. Δόθηκαν οι απαραίτητες λεπτομέρειες όσον αφορά τον κώδικα που δημιουργήθηκε για τον υπολογισμό των εμπειρικών ΣΣ και την παρουσίαση των διαφόρων παραμέτρων που οδήγησαν στην επιλογή των καταλληλότερων τιμών. Αμέσως μετά την επιλογή των βέλτιστων τιμών για τη δημιουργία των εμπειρικών ΣΣ, ακολούθησε η διαδικασία υπολογισμού των αναλυτικών ΣΣ με εκθετικά μοντέλα, μοντέλα Gauss-Markov για την cross-track περίπτωση, ενώ για την along track χρησιμοποιήθηκε και ένα μοντέλο σφαιρικών αρμονικών. Οι αναλυτικές συναρτήσεις χρησιμοποιήθηκαν ως στοιχεία εισόδου στον αλγόριθμο της πρόγνωσης για να προκύψουν οι τελικές εκτιμήσεις των τιμών της SLA, οι οποίες συγκρίθηκαν με τις υπάρχουσες τιμές προκειμένου να υπάρξει έλεγχος των εκτιμήσεων. Τέλος, εξετάζεται η πιθανή συσχέτιση μεταξύ της μεταβολής των μεταβλητοτήτων της SLA και παγκόσμιων ή τοπικών μετεωρολογικών και κλιματολογικών φαινομένων στο χώρο της Μεσογείου. Ειδικότερα, εξετάστηκε κατά πόσο η εμφάνιση ακραίων μετεωρολογικών φαινομένων (El Nino, La Nina) επηρεάζει την τιμή της SLA.

Η SLA εμφανίζει υψηλές τιμές τους χειμερινούς μήνες, χαμηλότερες την άνοιξη και το καλοκαίρι με τις μέγιστες τιμές να παρουσιάζονται πιο συχνά το φθινόπωρο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ένα τοπικό μέγιστο που παρατηρείται σε όλα τα σχήματα των καλοκαιρινών και φθινοπωρινών μηνών στην περιοχή με $\phi \approx 33.8°$ και $\lambda \approx 17.5°$. Η τιμή αυτή εμφανίζεται και στην απεικόνιση των τιμών της δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας (DOT) του μοντέλου της Rio που παρουσιάστηκε επίσης. Επομένως, πρόκειται για ένα φαινόμενο το οποίο οφείλεται σε κάποια τοπική ανωμαλία της περιοχής και η επίδραση του οποίου αποτυπώνεται σε όλα τα μεγέθη που σχετίζονται με την θαλάσσια τοπογραφία. Ταυτόχρονα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει το γεγονός πως στα σχήματα όπου το ίχνος του δορυφορικού ίχνους πλησιάζει το νησί της

Κέρκυρας παρουσιάζονται πολύ χαμηλές τιμές. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται και στον ευρύτερο χώρο του Ιονίου πελάγους στα υψόμετρα της ΜΣΘ και ως εκ τούτου οι τιμές αποδίδονται σε πιθανή γεωμορφολογική ανωμαλία της περιοχής χωρίς να αποκλείεται και η πιθανότητα χονδροειδούς σφάλματος λόγω της μικρής απόστασης των μετρήσεων από την ξηρά.

Παράλληλα, ενδιαφέρον παρουσιάζει η ετήσια μεταβολή των τιμών της μεταβλητότητας Co. Η μεταβολή αυτή ακολουθεί τη θερμική διαστολή της θάλασσας εξαιτίας της αύξησης των θερμοκρασιών το καλοκαίρι και τις αρχές του φθινοπώρου και μειώνεται τον χειμώνα λόγω της πτώσης της θερμοκρασίας. Η μέγιστη τιμή της μεταβλητότητας που παρατηρήθηκε είναι ~110 cm^2, η ελάχιστη ~20 cm^2 με τη μέση τιμή της να κυμαίνεται μεταξύ 50-60 cm^2. Επιπλέον, η διακύμανση αυτή μπορεί να αποδοθεί στη μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης στη Μεσόγειο. Όσον αφορά τη μορφή των ΣΣ, οι περισσότερες από τις συναρτήσεις ακολουθούν την τυπική γεωμετρική μορφή μιας ΣΣ. Ξεκινούν από μία μέγιστη τιμή και καταλήγουν σταδιακά σε τιμές κοντά στο μηδέν. Οι ταλαντώσεις που παρατηρούνται στις απεικονίσεις των συναρτήσεων εμφανίζονται μετά τα 300 km, κάτι που είναι λογικό αν σκεφτούμε πως το μήκος της δορυφορικής διάβασης είναι ~500 km.

Εξετάστηκε στη συνέχεια κατά πόσο επηρεάζει η εφαρμογή της αντίστροφης βαρομετρικής διόρθωσης τις τιμές της SLA αλλά και τη μορφή της εμπειρικής ΣΣ. Ειδικότερα, για το 2009, υπολογίστηκαν οι τιμές της SLA και οι αντίστοιχες ΣΣ πριν και μετά την εφαρμογή της διόρθωσης για όλους τους μήνες. Η εφαρμογή της αντίστροφης βαρομετρικής διόρθωσης επηρεάζει αρκετά την τιμή της SLA (~5-10 cm) στις περισσότερες περιπτώσεις. Ωστόσο, η μορφή της ΣΣ και οι τιμές των μεταβλητοτήτων επηρεάζονται ελάχιστα αφού κατά μήκος του δορυφορικού ίχνους δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στην τιμή της διόρθωσης.

Όσον αφορά την μελέτη στις δύο διαστάσεις (cross-track) εξετάστηκαν δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη δημιουργήθηκαν εμπειρικές ΣΣ για το σύνολο των δορυφορικών διαβάσεων ενός ολόκληρου έτους (2008, κύκλοι 65-74) και στη δεύτερη δημιουργήθηκε ΣΣ σε ένα παράθυρο δεδομένων έξι διαδοχικών κύκλων. Η τάση για μεγάλες τιμές της μεταβλητότητας τους μήνες Ιούνιο-Ιούλιο-Αύγουστο του 2008 που παρατηρήθηκε για τη διάβαση 444 αποτυπώνεται και στο σύνολο των διαβάσεων της ίδιας χρονιάς. Είναι χαρακτηριστικό πως για το σύνολο των δορυφορικών διαβάσεων, οι σημαντικά μεγαλύτερες τιμές μεταβλητότητας παρατηρούνται τους ίδιους μήνες. Επίσης, το μέτρο της διαφοράς των μεταβλητοτήτων μεταξύ των μηνών είναι το ίδιο και στις δύο περιπτώσεις και το μόνο που μεταβάλλεται είναι η τιμή της μεταβλητότητας. Ένα ακόμη συμπέρασμα που μπορεί να διατυπωθεί για τη ΣΣ είναι πως η τιμή της μεταβλητότητας δεν εξαρτάται από το πλήθος των δεδομένων (SLA). Είναι χαρακτηριστικό πως η μεταβλητότητα 7026 δεδομένων είναι 140.3 cm^2 ενώ για 11871 δεδομένα είναι 132 cm^2. Επομένως, το εύρος της μεταβλητότητας εξαρτάται μόνο από την τιμή του μεγέθους που μελετάται και όχι από το πλήθος των διαθέσιμων δεδομένων. Τέλος, το μήκος συσχέτισης, όταν η ΣΣ ακολουθεί και έχει την τυπική της μορφή, είναι ανάλογο με το μέγεθος της μεταβλητότητας (π.χ. για τις τιμές της Co 209.5, 207.2 και 173.4 cm^2 παρατηρούνται αντίστοιχα τα μήκη συσχέτισης 256, 275 και 197 km).

Στην περίπτωση του παράθυρου δεδομένων, εξετάστηκε για τους κύκλους από 65 ως 70 το πλήθος των δεδομένων που βρισκόταν στην περιοχή με γεωγραφικό πλάτος $32° \leq \phi \leq 36°$ και γεωγραφικό μήκος $15° \leq \lambda \leq 20°$. Η τιμή της μεταβλητότητας Co πέφτει στα επίπεδα των ΣΣ που είχαμε παρατηρήσει στην περίπτωση των along track συναρτήσεων. Ειδικότερα, η τιμή της ~60 cm^2 είναι πολύ μικρότερη των 140.3

cm^2 (κύκλος 66) που είναι η μικρότερη τιμή που παρατηρήθηκε στις cross track συναρτήσεις και αφορούσαν τα δεδομένα των ίδιων κύκλων. Ωστόσο, η τιμή αυτή προσεγγίζει τη μέση τιμή των μεταβλητοτήτων (~56 cm^2) του περάσματος 444 για το ίδιο χρονικό διάστημα (συναρτήσεις του περάσματος στους αντίστοιχους κύκλους). Η περιοχή του παράθυρου δεδομένων έχει την ίδια περίπου έκταση με αυτήν της περίπτωσης της along track συνάρτησης και για δεδομένα που αφορούν το ίδιο χρονικό διάστημα οι τιμές της Co είναι περίπου ίσες. Παρατηρούμε, επομένως πως η τιμή της μεταβλητότητας επηρεάζεται από το εύρος της περιοχής μελέτης καθώς μεγαλύτερη έκταση συνεπάγεται και μεγαλύτερη τιμή της μεταβλητότητας Co.

Στην κατηγορία των cross-track συναρτήσεων που υπολογίστηκαν εντάσσεται και η εμπειρική ΣΣ για το μοντέλο της δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας της Rio για τη Μεσόγειο. Η τιμή της Co είναι 46 cm^2 προσεγγίζοντας την πλειοψηφία των τιμών των μεταβλητοτήτων της SLA ενώ η μορφή της ΣΣ ακολουθεί την τυπική μορφή της ΣΣ. Το μοναδικό στοιχείο που δε συμβαδίζει με τα χαρακτηριστικά των ΣΣ που είχαμε συναντήσει μέχρι σήμερα είναι το μήκος συσχέτισης είναι αρκετά μεγάλο (~321 km) για μια τόσο μικρή τιμή της μεταβλητότητας (46 cm^2). Ωστόσο, υπάρχει εξήγηση καθώς η ΣΣ μεταβάλλεται πολύ ομαλά με αποτέλεσμα το μήκος συσχέτισης να έχει μεγαλύτερη τιμή.

Οι εμπειρικές συναρτήσεις που υπολογίστηκαν αποτέλεσαν τη βάση για τον υπολογισμό αναλυτικών συναρτήσεων τόσο στην along track όσο και στην cross track περίπτωση. Στην περίπτωση των αναλυτικών συναρτήσεων along track τα μοντέλα που συνδυάζουν δύο ή περισσότερες συναρτήσεις προσαρμόζονται καλύτερα στην εμπειρική. Ειδικότερα, το δεύτερο μοντέλο (άθροισμα δύο εκθετικών), το πέμπτο (γινόμενο εκθετικής και τριγωνομετρικής) και το έκτο (γινόμενο αθροίσματος και εκθετικής) προσεγγίζουν καλύτερα την εμπειρική ΣΣ. Αντίθετα, οι άλλες τρεις συναρτήσεις προσεγγίζουν την εμπειρική σε ένα μόνο κομμάτι της. Όσον αφορά τα μοντέλα Markov, τα χαρακτηριστικά μεγέθη της ΣΣ του μοντέλου τρίτου βαθμού είναι πιο κοντά στα αντίστοιχα της εμπειρικής ωστόσο η συνάρτηση δευτέρου βαθμού είναι αυτή που οπτικά φαίνεται να προσαρμόζεται καλύτερα στην εμπειρική. Το μοντέλο τρίτου βαθμού στα αρχικά μήκη σχεδίασης ~90 km προσεγγίζει καλύτερα την εμπειρική και για αυτό τα χαρακτηριστικά μεγέθη της αναλυτικής συνάρτησης είναι κοντά στις τιμές της εμπειρικής. Στο υπόλοιπο κομμάτι, απομακρύνεται αρκετά από τις τιμές της εμπειρικής και μόνο στο τελευταίο κομμάτι, όπου οι τιμές είναι κοντά στο 0, προσεγγίζει ξανά την εμπειρική. Το μοντέλο δευτέρου βαθμού, από την άλλη μεριά, μόνο στο πρώτο κομμάτι βρίσκεται μακριά από την εμπειρική. Στο υπόλοιπο κομμάτι, μετά τα ~120 km οι τιμές των δύο συναρτήσεων είναι πολύ κοντά, ενώ υπάρχουν και τμήματα (κοντά στα 250 km) όπου οι τιμές των δύο συναρτήσεων ταυτίζονται. Τέλος το μοντέλο των σφαιρικών αρμονικών σε κανένα σημείο δε προσεγγίζει την εμπειρική ΣΣ. Παρά το γεγονός πως έγιναν αρκετές δοκιμές δε κατορθώσαμε να προσεγγίσουμε την εμπειρική ΣΣ. Μια πιθανή αιτία για τη μεγάλη απόκλιση μεταξύ των δύο συναρτήσεων θεωρήθηκαν τα μικρά όρια της περιοχής μελέτης στην along track περίπτωση. Το μοντέλο του Knudsen δημιουργήθηκε για την περιοχή μεταξύ Μεγάλης Βρετανίας και Γροιλανδίας (Knudsen et al.,2004) και ίσως ένας συντελεστής κλίμακας να είναι απαραίτητος για την αναγωγή από μια μεγάλη περιοχή σε μία αρκετά μικρότερη. Επίσης, ο περιορισμένος αριθμός διαθέσιμων δεδομένων ίσως να είναι μια άλλη αιτία για το αποτέλεσμα. Ο αριθμός των παρατηρήσεων δεν προσφέρει επαρκή πληροφορία για τον προσδιορισμό των συντελεστών και οι τιμές αυτών αντικατοπτρίζουν τα χαρακτηριστικά μόνο για το συγκεκριμένο πέρασμα. Πράγματι, οι τιμές των συντελεστών που προσδιορίστηκαν, όταν εξετάστηκαν για τις τιμές ενός άλλου

περάσματος έδωσαν μια νέα μορφή συνάρτησης η οποία δεν παρουσίαζε κανένα κοινό στοιχείο με την προηγούμενη.

Οι παρατηρήσεις που κάναμε στην along track περίπτωση, ανταποκρίνονται και στην cross-track περίπτωση για τα δεδομένα του κύκλου 74. Δεύτερο και πέμπτο μοντέλο προσαρμόζονται αρκετά καλά με τα υπόλοιπα μοντέλα να παρουσιάζουν μικρότερες ή μεγαλύτερες αποκλίσεις από την εμπειρική συνάρτηση. Τα μοντέλα Gauss-Markov δεν παρουσιάζουν και την καλύτερη προσαρμογή στην εμπειρική ΣΣ. Το μοντέλο δευτέρου βαθμού έχει αρκετά μικρή τιμή μεταβλητότητας (~85 cm^2 έναντι ~132 cm^2 της εμπειρικής) ωστόσο η ομαλή μεταβολή του έχει ως αποτέλεσμα να προσεγγίζει ικανοποιητικά την εμπειρική στο μεγαλύτερο μήκος σχεδίασης. Αντίθετα, το μοντέλο τρίτου βαθμού αν και έχει μεταβλητότητα κοντά στην αντίστοιχη τιμή της εμπειρικής (~127 cm^2) η απότομη και γρήγορη μεταβολή του που έχει ως αποτέλεσμα να προσεγγίζει το 0, έχει ως αποτέλεσμα, το μοντέλο μετά τα 100 km να απέχει αρκετά από την εμπειρική και να προσεγγίζει μόνο στις τιμές της κοντά στο 0, στα μεγάλα μήκη μετά τα 1500 km.

Στην περίπτωση του παράθυρου δεδομένων το σύνολο των μοντέλων προσαρμόζεται αρκετά καλά στην εμπειρική ΣΣ. Το μικρό μήκος σχεδίασης και οι μικρές τιμές των μεταβλητοτήτων συντελούν στην ικανοποιητική προσαρμογή μεταξύ των δύο μοντέλων. Το μοντέλο τρίτου βαθμού παρουσιάζει τιμή μεταβλητότητας ίδια με αυτή την εμπειρικής (~57.32). Η μορφή των συναρτήσεων είναι κοινή μέχρι τα πρώτα 25 km αλλά έπειτα η απότομη πτώση της τιμής του μοντέλου έχει ως αποτέλεσμα οι δύο συναρτήσεις να προσεγγίσουν η μία την άλλη μετά τα 250 km. Από την άλλη μεριά, το μοντέλο δευτέρου βαθμού παρουσιάζει και εδώ μικρότερη τιμή μεταβλητότητας από την αντίστοιχη εμπειρική(~43-~57). Ωστόσο, η πιο ομαλή μεταβολή του μοντέλου αυτού έχει ως αποτέλεσμα να προσεγγίζει την εμπειρική καλύτερα σε περισσότερα μήκη σχεδίασης.

Μέσω των αναλυτικών συναρτήσεων συμμεταβλητότητας προχωρήσαμε στην πρόγνωση τιμών. Στην along track η πρόγνωση με τη χρήση εκθετικών συναρτήσεων δίνει γενικά τα καλύτερα αποτελέσματα με το μοντέλο που αποτελεί συνδυασμό εκθετικής και τριγωνομετρικής συνάρτησης να παρουσιάζει τα μικρότερα σφάλματα πρόγνωσης. Τα μοντέλα Markov παρουσιάζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα τόσο στην along track όσο και στην cross-track περίπτωση αλλά τα αποτελέσματα τους στο παράθυρο δεδομένων είναι αρκετά εκατοστά χειρότερα στην περίπτωση του μοντέλου δεύτερης τάξης και απαγορευτικά στην περίπτωση του μοντέλου τρίτης τάξης. Σε όλες τις περιπτώσεις το μοντέλο σφαιρικών αρμονικών παρουσίασε απογοητευτικά αποτελέσματα.

Τέλος εξετάστηκε και πιθανή συσχέτιση μεταξύ τιμών της μεταβλητότητας και τιμών δεικτών που περιγράφουν μετεωρολογικά και κλιματολογικά φαινόμενα. Από τα αποτελέσματα φάνηκε πως η εμφάνιση των El Niño/La Niña έχει αντίκτυπο στη στάθμη της Μεσογείου με μία καθυστέρηση 4-8 μηνών ανάλογα με την ένταση των φαινομένων. Υψηλή συσχέτιση μεταξύ των τιμών του δείκτη NAO και των μεταβολών της στάθμης ης Μεσογείου παρουσιάστηκε κατά τους χειμερινούς μήνες με τα αποτελέσματα να μην είναι τόσο εμφανή τους καλοκαιρινούς. Αντίθετα, αποδείχτηκε πως θετικές τιμές του δείκτη MOI συνδέονται με πτώση της στάθμης εξαιτίας ξηρότερων συνθηκών. Τέλος, στις περισσότερες περιπτώσεις οι δείκτες NAO και MOI είναι αρκετά συσχετισμένοι και ακολουθεί ο ένας τον άλλο, ειδικότερα το χειμώνα και το φθινόπωρο, ενώ η μη συμφωνία τους την άνοιξη και το καλοκαίρι φανερώνουν πως οι

ατμοσφαιρικές συνθήκες στο βόρειο Ατλαντικό δεν είναι ο κύριος παράγοντας για την κατάσταση στη Μεσόγειο.

Με το πέρας της μεταπτυχιακής διατριβής θεωρείται χρήσιμο να προταθεί ένα γενικό πλαίσιο για μελλοντική έρευνα στο συγκεκριμένο πεδίο, με το οποίο πραγματεύτηκε η παρούσα εργασία. Αν και μέχρι στιγμής πολλές μελέτες και έρευνες έχουν εφαρμοστεί πάνω στο συνδυασμό δεδομένων και στις μεθόδους επεξεργασίας δεν έχει δοθεί η αρμόζουσα προσοχή στη μετάδοση των σφαλμάτων μέσω των αναλυτικών πινάκων μεταβλητοτήτων-συμμεταβλητοτήτων γεγονός αρκετά σημαντικό καθώς μπορεί να παρέχει αξιόπιστες εκτιμήσεις των σφαλμάτων των σημάτων. Αυτή η διαδικασία είναι ιδιαίτερα σημαντική σε μεθόδους όπως αυτή των ελαχίστων τετραγώνων όπου οι αντίστοιχοι πίνακες τόσο των δεδομένων όσο και των σημάτων πρέπει να προσδιοριστούν.

Η παραπάνω διαδικασία είναι αρκετά χρήσιμη καθώς μέσω αυτής προκύπτει η πρόγνωση τιμών. Η πρόγνωση που πραγματοποιήσαμε έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα αποδεικνύοντας το γεγονός ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου παρουσιάζεται έλλειψη δεδομένων. Τα απογοητευτικά ωστόσο αποτελέσματα που παρουσίασε το μοντέλο των σφαιρικών αρμονικών είναι ένα γεγονός που απαιτεί περισσότερη έρευνα με το συντελεστή κλίμακας που χρησιμοποιήθηκε να αποτελεί την πιθανότερη αιτία των μεγάλων σφαλμάτων. Τέλος, μελλοντικές έρευνες πρέπει να ασχοληθούν και με την εισαγωγή της παραμέτρου του χρόνου ως μεταβλητή στα αναλυτικά μοντέλα έτσι ώστε οι μεταβολές της SLA να μοντελοποιηθούν ως προς τον χρόνο μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση

1. Barzaghi, R., Tselfes, N., Tziavos, I.N. & Vergos, G.S. (2009). Geoid and High Resolution Sea Surface Topography Modelling in the Mediterranean from Gravimetry, Altimetry and GOCE Data: Evaluation by Simulation. J. Geod. 83(8):751-772.
2. Chelton, D.B., Ries, J.C., Haines, B.J., Fu, L.-L. & Callahan, P.S. (2001). Satellite altimetry. In International Geophysics Series "Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications" (Eds. L.-L. Fu & A. Cazenave), Academic Press, San Diego 69:4-131.
3. Garcia, D., Ramillien, G., Lombard, A. & Cazenave, A. (2007). Steric sea-level variations inferred from combined Topex/Poseidon altimetry and GRACE gradiometry. Pure Appl. Geophys. 164:721-731.
4. Heiskanen, W.A. & Moritz, H. (1967). Physical Geodesy. W.H. Freeman, San Fransisco.
5. Jordan, S.K. (1972) Self-Consistent Statistical Models for the Gravity Anomaly, Vertical Deflections, and Undulation of the Geoid. J. Geophys. Res. 77(20):3660-3670.
6. Knudsen, P. (1987). Estimation and modelling of the local empirical covariance function using gravity and satellite altimeter data. Bull. Geod. 61:45-160.
7. Knudsen, P. (1991). Simultaneous estimation of the gravity field and sea surface topography from satellite altimeter data by least-squares collocation. Geophys. J. Inter. 104(2):307-317.
8. Knudsen, P. (1992). Estimation of sea surface topography in the Norwegian sea using gravimetry and Geosat altimetry. Bull. Géod. 66:27-40.
9. Knudsen, P. (1993). Integration of gravity and altimeter data by optimal estimation techniques. In Lecture Notes in Earth Sciences "Satellite Altimetry for Geodesy and Oceanography" (Eds. R. Rummel & F. Sansò), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 50:453-466.
10. Knudsen, P. & Tscherning, C.C. (2007). Error Characteristics of dynamic topography models derived from altimetry and GOCE Gravimetry. In IAG Symposia "Dynamic Planet 2005 - Monitoring and Understanding a Dynamic Planet with Geodetic and Oceanographic Tools" (Eds. Tregoning P. & Rizos, C.), Vol.130. Springer Berlin Heidelberg, pp. 11-16.
11. Koblinsky, C.J., Ray, R.D., Beckeley, B.D., Wang, Y.-M., Tsaoussi, L., Brenner, A., and R. Williamson, NASA ocean altimeter Pathfinder project report 1: Data processing handbook, NASA/TM-1998-208605, 1999Moritz, H. (1980). Advanced Physical Geodesy. Wichmann, Karlsruhe.
12. RADS (2012) Radar altimetry database system, Delft Institute for Earth-Oriented Space research (DEOS), http://rads.tudelft.nl/rads/rads.shtml. [Accessed: January 2012]

13. Rio, M.H. & Hernandez, F. (2004). A mean dynamic topography computed over the world ocean from altimetry, in-situ measurements and a geoid model. J. Geoph. Res. 109(12):C12032
14. Tscherning, C.C. & Rapp, R.H. (1974). Closed covariance expressions for gravity anomalies, geoid undulations, and deflections of the vertical implied by anomaly degree-variance models. Reports of the Department of Geodetic Science, 208, The Ohio State University, Columbus, Ohio.
15. Vassiliou, A.A. (1988) The computation of aliasing effects in local gravity field approximation. Bull. Geod. 62(1):41-58.
16. Vergos, G.S., Tziavos, I.N. & Andritsanos, V.D. (2005). On the determination of marine geoid models by least-squares collocation and spectral methods using heterogeneous data. In International Association of Geodesy Symposia "A Window on the Future of Geodesy" (Ed. F. Sansó), Vol. 128. Springer, pp. 332-337.
17. Vergos, G.S., Tziavos, I.N. & Sideris, M.G. (2012). On the determination of sea level changes by combining altimetric, tide gauge, satellite gravity and atmospheric observations. In International Association of Geodesy Symposia "Geodesy for Planet Earth" (Eds. S. Kenyon, C. Pacino & U. Marti), Vol. 136, Springer, pp. 123-130.
18. Vergos, G.S., Tziavos, I.N. & Natsiopoulos, D.A (2012). Sea Level Anomaly and Dynamic Ocean Topography analytical covariance functions in the Meditteranean Sea from Envisat data
19. Vergos, G.S, Natsiopoulos, D.A (2012). Ocean Remote Sensing in support of sea level anomalies and mean sea surface modeling

Ελληνική

20. Αραμπέλος (2002). Εισαγωγή στη Θεωρία του Δυναμικού. Εκδόσεις Ζήτη.
21. Αραμπέλος, Τζιαβός Η.Ν (2001). Εισαγωγή στο Πεδίο Βαρύτητας. Διδακτικές σημειώσεις ΤΑΤΜ/ΑΠΘ.
22. Βέργος Γ.Σ. (2000). Η συμβολή της δορυφορικής αλτιμετρίας στην προσέγγιση του πεδίου βαρύτητας: Εφαρμογή στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου. Διπλωματική Εργασία, Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
23. Δερμάνης Α. (1986). Συνορθώσεις παρατηρήσεων και θεωρία εκτίμησης – Τόμος 1. Εκδόσεις Ζήτη.
24. Δερμάνης Α. (1987). Συνορθώσεις παρατηρήσεων και θεωρία εκτίμησης – Τόμος 2. Εκδόσεις Ζήτη.
25. Δερμάνης Α. (1999). Διαστημικές μέθοδοι Γεωδαισίας και Γεωδυναμικής. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
26. Δερμάνης Α., Φωτίου Α. (1995). Μέθοδοι και εφαρμογές συνόρθωσης παρατηρήσεων. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
27. Κατσαδούρου Α. (2012). Η συμβολή των σύγχρονων γεωδυναμικών μοντέλων των αποστολών GRACE & GOCE στον προσδιορισμό της δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας με συνδυασμό αλτιμετρικών δεδομένων.

28. Κατσάμπαλος Κ.Ε., Τζιαβός Η.Ν. (1991). Φυσική Γεωδαισία. Εκδόσεις Ζήτη.
29. Νατσιόπουλος Δ.Α. (2010). Προσδιορισμός μοντέλων ΜΣΘ και μεταβολών της θάλασσας σε διάφορες χωρικές και χρονικές κλίμακες από δεδομένα δορυφορικής αλτιμετρίας
30. Τσαμπουράκη-Κραουνάκη (2008). Παλαιογεωγραφική ανάπλαση της περιοχής Πόρου-Μοδίου με εφαρμογή μεθόδων θαλάσσιας γωφυσικής διασκόπησης

Διαδίκτυο

- http://el.wikipedia.org
- http://www.lib.utexas.edu
- http://themoderatevoice.com
- http://earthobservatory.nasa.gov
- http://ibis.grdl.noaa.gov
- http://www.grdl.noaa.gov/SAT/gdrs/geosat_handbook/figures/gif/geosat.gif
- http://www.ga.gov.au
- http://www-aviso.cnes.fr
- http://www.guarniero.nl
- http://gizmodo.com
- http://www.aviso.oceanobs.com
- http://esamultimedia.esa.int
- http://spacegizmo.livingdazed.com
- http://earth.esa.int
- http://cersat.ifremer.fr
- http://ilrs.gsfc.nasa.gov
- http://survey.ntua.gr
- http://deos.tudelft.nl
- http://poseidon.hcmr.gr

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ