

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών Γεωπληροφορική
Κατεύθυνση Σύγχρονες Γεωδαιτικές Εφαρμογές

Γεώργιος Δ. Καρανταΐδης

Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός Α.Π.Θ.

Μελέτη του πεδίου βαρύτητας στην ευρύτερη
περιοχή της Κρήτης με επίγεια δεδομένα
βαρύτητας και δεδομένα της δορυφορικής
αποστολής *Cryosat-2*

Μεταπτυχιακή διατριβή
που υποβλήθηκε στο Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
της Πολυτεχνικής Σχολής του Α.Π.Θ.



Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών

Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή με τίτλο «**Μελέτη του πεδίου βαρύτητας στην ευρύτερη περιοχή της Κρήτης με επίγεια δεδομένα βαρύτητας και δεδομένα της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2**» εκπονήθηκε από το φοιτητή Γεώργιο Δ. Καρανταϊδη στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Γεωπληροφορική» στην κατεύθυνση «Σύγχρονες Γεωδαιτικές Εφαρμογές», στο Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Ηλία Ν. Τζιαβού.

Σκοπός της μεταπτυχιακής διατριβής είναι η μελέτη του πεδίου βαρύτητας στην ευρύτερη περιοχή της Κρήτης, η οποία παρουσιάζει ιδιαίτερο γεωδυναμικό, γεωλογικό, αλλά και ωκεανογραφικό ενδιαφέρον και ως εκ τούτου πολλές ερευνητικές εργασίες εστιάζονται την περιοχή αυτή. Η μελέτη αποσκοπεί στη δημιουργία διαφόρων γεωδυναμικών προσεγγίσεων στην περιοχή εκμεταλλεύμενη τα δεδομένα της δορυφορικής αλτιμετρίας της δορυφορικής αποστολής του CRYOSAT-2 από το 2010 έως και το 2015. Τα πρωτογενή δεδομένα που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν όλους τους κύκλους (cycles) και διαβάσεις (passes). Η δημιουργία προσεγγίσεων του γεωειδούς, της Μέσης Στάθμης Θάλασσας (ΜΣΘ) και ανωμαλιών βαρύτητας πραγματοποιείται στην ευρύτερη περιοχή της Κρήτης και πιο συγκεκριμένα στην περιοχή, η οποία περιλαμβάνεται μεταξύ των ορίων $22^\circ \leq \lambda \leq 27^\circ$, $34^\circ \leq \varphi \leq 36^\circ$. Οι διάφορες προσεγγίσεις του γεωδυναμικού πραγματοποιήθηκαν με διάφορα μαθηματικά μοντέλα, με κυρίαρχη τη μέθοδο της σημειακής προσαρμογής (Least Squares Collocation - LSC) και τη χρήση του λογισμικού GRAVSOFT. Για το σκοπό αυτό υπολογίστηκαν οι εμπειρικές και αναλυτικές συναρτήσεις συμμεταβλητότητας για τα διαθέσιμα δεδομένα. Επίσης, για την εξαγωγή των μοντέλων βαρύτητας-γεωειδούς χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα διπλής εισόδου-απλής εξόδου, από τη θεωρία συστημάτων, για τον υπολογισμό υψομέτρων γεωειδούς. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιήθηκαν φασματικές τεχνικές μέσω γρήγορων μετασχηματισμών Fourier (Fast Fourier Transforms – FFT) που περιλαμβάνουν το ολοκλήρωμα του Stokes για επίπεδη και σφαιρική

προσέγγιση. Η δημιουργία των μοντέλων βαρύτητας-γεωειδούς ολοκληρώθηκε με τη συνεισφορά του πλέον πρόσφατου και ακριβούς γεωδυναμικού μοντέλου EGM2008. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση και σύγκρισή τους με προϋπάρχοντα μοντέλα γεωειδούς και βαρύτητας για την περιοχή μελέτης. Επιπλέον, για την αξιολόγηση της εξωτερικής ακρίβειας των μοντέλων που υπολογίστηκαν από τα προϊόντα αλτιμετρίας της αποστολής CRYOSAT-2, πέραν των διαθέσιμων μοντέλων για την περιοχή, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση και σύγκριση με προϋπάρχουσες λύσεις γεωειδούς (βαρυτημετρική και λύση συνδυασμού βαρύτητας και αλτιμετρίας) κατά μήκος των δορυφορικών ίχνών των δορυφορικών αποστολών JASON-1, JASON-2 και SARAL από διάφορες χρονικές περιόδους. Οι αξιολογήσεις των μοντέλων βαρύτητας και γεωειδούς για τις διάφορες περιπτώσεις έγιναν λαμβάνοντας υπόψη όλη την περιοχή μελέτης, αλλά πραγματοποιήθηκαν και συγκρίσεις που αναφέρονταν μόνο στη θαλάσσια έκταση της περιοχής μελέτης.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται εκτενώς η δορυφορική αποστολή CRYOSAT-2, οι βασικοί της στόχοι και τα στοιχεία που τη συνθέτουν. Παρουσιάζονται, επίσης, οι στόχοι της παρούσας εργασίας, οι λόγοι επιλογής της περιοχής μελέτης και η διάρθρωση της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνονται οι πληροφορίες σχετικά με τα δεδομένα της δορυφορικής αλτιμετρίας που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη, οι τεχνικές παρεμβολής που χρησιμοποιήθηκαν και οι επεξεργασίες που πραγματοποιήθηκαν. Επίσης, παρουσιάζονται τα χρησιμοποιούμενα παγκόσμια γεωδυναμικά μοντέλα, καθώς και μοντέλα δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας, καθώς επίσης και προϋπάρχοντα μοντέλα γεωειδούς και βαρύτητας για την περιοχή μελέτης από προηγούμενες έρευνες.

Στο τρίτο κεφάλαιο σχολιάζονται εκτενώς τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν, αλλά και στοιχεία των συγκρίσεων εξωτερικής ακρίβειας. Περιγράφεται επίσης το μαθηματικό υπόβαθρο και οι βασικές έννοιες της μεθόδου της σημειακής προσαρμογής, των φασματικών τεχνικών και των συστημάτων εισόδου-εξόδου.

Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα αποτελέσματα των φασματικών τεχνικών υπολογισμού του γεωειδούς και των ανωμαλιών βαρύτητας, αλλά και του συστήματος διπλής εισόδου-απλής εξόδου. Ακόμη, παρουσιάζονται λεπτομερώς τα μοντέλα γεωειδούς, μέσης στάθμης της θάλασσας και βαρύτητας που προέκυψαν από τα δεδομένα της αποστολής CRYOSAT-2. Ακόμη, δίνονται οι μεταξύ τους συγκρίσεις, αλλά και αποτελέσματα εξωτερικής ακρίβειας με ήδη υπάρχοντα μοντέλα για την περιοχή. Τέλος, γίνεται αξιολόγηση των μοντέλων αυτών με μοντέλα γεωειδούς κατά μήκος των δορυφορικών ιχνών των δορυφορικών αποστολών JASON-1, JASON-2, SARAL.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα των αξιολογήσεων που προέκυψαν από τη μελέτη του πεδίου βαρύτητας της ευρύτερης περιοχής της Κρήτης από επίγεια δεδομένα και δεδομένα αλτιμετρίας του CRYOSAT-2 και διατυπώνονται προτάσεις βελτίωσης και μελλοντικής έρευνας.

Abstract

The present Master of Science Thesis entitled “Gravity field modeling in the wider Crete area using surface gravity data and altimetry data from CRYOSAT–2 satellite mission” has been prepared in partial fulfillment for the degree of Master Dipl. Eng. of the Specialization Program “Modern Geodetic Applications” of the Graduate Studies Program “Geoinformatics” of the School of Rural and Surveying Engineering of the Aristotle University of Thessaloniki by the graduate student Georgios Karantaidis under the supervision of Professor Ilias N. Tziavos.

The main objective of this research is the investigation of the earth’s gravity field in the wider area of the island of Crete, which is of main importance for geodetic, geodynamic and oceanographic studies. The geodynamic peculiarities of the test area and the eastern Mediterranean basin in general, along with the strong signature of the gravity field and the recent availability of large amounts of ground and satellite data, made the area a natural laboratory for geoscientists and numerous researches have been published during the last decades. Our study mainly focuses on the determination of geoid, mean sea surface (MSS) and gravity models for the area bounded by $22^\circ \leq \lambda \leq 27^\circ$, $34^\circ \leq \varphi \leq 36^\circ$ using data of the CRYOSAT-2 satellite mission. These data sets were available in the form of sea surface heights (SSHs) and Sea Level Anomalies (SLA) and were used in conjunction with surface gravity anomalies and the EGM2008 global geopotential model as a reference surface.

The methods employed for the various solutions of the gravity field are both stochastic and spectral ones, i.e. the Least Squares Collocation (LSC) method, the Fast Fourier Transform (FFT) technique for the elaboration of the Stokes integral in planar and spherical approximation and, finally, the Input Output Systems Theory (IOST), which is in practice the spectral representation of LSC. Furthermore, linear, bilinear, nearest neighbor and kriging interpolation methods are used within MATLAB in order to produce gravity, geoid and MSS models for the area under study. The results and models achieved from all methods are compared and

analyzed both for the entire test area and the sea area. In order to assess the validity of the geoid and gravity models determined by the different approaches for the sea areas, comparisons were carried out with existed geoid models along the tracks of JASON-1, JASON-2 and SARAL altimetry missions.

For the application of LSC by means of the GRAVSOFT (Tscherning et al. 1992) software and its internal modules empirical and analytical covariance functions were estimated for the residual gravity anomalies after the subtraction of the contribution of EGM2008. In this way the study of the statistical and spectral characteristics of the gravity field data sets was performed and their efficient implementation in LSC method was carried out.

The thesis is structured in five chapters. The first chapter contains a brief outline of the objectives of the study and presents extensively the CRYOSAT-2 satellite mission.

The second chapter deals with the altimetry data used in this thesis and their processing methods. Moreover, the global geopotential model EGM2008 that is used in this project and the methodology followed for geoid and gravity determination. Additionally, other research projects of geoid and gravity field available for the study area are presented, along with information regarding the Mean Dynamic Topography model (Rio et al. 2007) used in data processing.

The third chapter analyzes the fundamental theoretical background of the methods used in the numerical tests, i.e. LSC, FFT and Input-Output systems.

The detailed presentation of the results regarding the different gravity, geoid and MSS models, as well as the statistics of their comparisons are extensively discussed in the fourth chapter.

The last chapter summarizes the conclusions of the thesis and outlines some recommendations for further investigation.

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	I
ABSTRACT	V
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	VII
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	IX
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	XI
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	XVII
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	XXIII
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΕΛΕΤΗΣ	1
1.1. Η ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΑΠΟΣΤΟΛΗ CRYOSAT-2	1
1.2. ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	15
1.3. ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	16
2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....	19
2.1. ΔΕΔΟΜΕΝΑ CRYOSAT-2	19
2.2. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ – ΑΝΑΓΩΓΕΣ	21
2.3. ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	28
2.4. ΜΟΝΤΕΛΑ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ ΑΠΟ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ	31
2.5. ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	34
3. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ – ΜΕΘΟΔΟΙ	39
3.1. ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ	39

3.2. ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ – FFT	49
3.3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΙΣΟΔΟΥ – ΕΞΟΔΟΥ.....	52
4. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ, ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ, ΜΕΣΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ	57
4.1. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΩΜΑΛΙΩΝ ΣΤΑΘΜΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ.....	57
4.2. ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕΣΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ	63
4.3. ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΜΕΣΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ.....	71
4.4. ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ	74
4.5. ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ	82
4.6. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ ΤΟΥ CRYOSAT-2	85
4.7. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ	105
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	111
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	117
ΠΗΓΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ	121

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη μεταπτυχιακή μου εργασία και κλείνοντας έτσι τον κύκλο μου ως μεταπτυχιακού φοιτητή του Τμήματος Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών (ΤΑΤΜ) του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ) θέλω να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συνεισέφεραν και βοήθησαν στην ολοκλήρωσή της.

Ευχαριστώ τον Καθηγητή μου Ηλία Ν. Τζιαβό, ο οποίος δέχθηκε, κατ' αρχήν, να μου αναθέσει την παρούσα εργασία σε συνέχεια της συνεργασίας μας σε προπτυχιακό επίπεδο. Η καθοδήγηση, η βοήθεια και η συμπαράστασή του ήταν συνεχείς και καθοριστικές για την πορεία μου ως φοιτητή του Τμήματος. Θα ήταν παράλειψη αν δεν ανέφερα το γεγονός πως ήταν πρόθυμος οποιαδήποτε στιγμή να απαντήσει στις απορίες μου, να με συμβουλέψει και να αντιμετωπίσουμε οποιαδήποτε πρόβλημα προέκυπτε. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την παραχώρηση και τη φιλοξενία μου στο χώρο του εργαστηρίου Μελέτης και Εφαρμογών του Πεδίου Βαρύτητας (GravLab), όπου ολοκλήρωσα το υπολογιστικό μέρος της εργασίας μου. Τον ευχαριστώ πολύ.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή του ΤΑΤΜ – ΑΠΘ, Γεώργιο Σ. Βέργο για τη βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της εργασίας σε θεωρητικά και υπολογιστικά ζητήματα. Τον ευχαριστώ θερμά, επίσης, για την παραχώρηση προσωπικού του λογισμικού που με βοήθησε καθοριστικά σε πολλά σημεία της δουλειάς μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή του ΤΑΤΜ – Α.Π.Θ. Βασίλειο Γρηγοριάδη για την πολύτιμη βοήθεια του σε θεωρητικά ζητήματα, καθώς επίσης και την καθοδήγησή του σε ζητήματα λογισμικού. Τον ευχαριστώ θερμά, διότι εκτός από τη βοήθεια, ήταν πάντοτε διαθέσιμος να συμβάλει στην επίλυση των προβλημάτων και των αποριών που προέκυπταν.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή του ΤΕΙ Αθήνας Βασίλειο Δ. Ανδριτσάνο για την παραχώρηση λογισμικού σχετικού με τα συστήματα

εισόδου-εξόδου, που χρησιμοποιήθηκε για την ολοκλήρωση των υπολογιστικών πειραμάτων της παρούσας εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα του ΤΑΤΜ Δημήτριο Νατσιόπουλο για την παραχώρηση δεδομένων καθώς και για τη βοήθειά του σε υπολογιστικά ζητήματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 Ακρίβειες του SIRAL.....	8
Πίνακας 1.2 Ο δέκτης του συστήματος DORIS (http://www.earth.esa.int).....	10
Πίνακας 2.1 Στατιστικά χαρακτηριστικά των πρωτογενών SLA της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2	22
Πίνακας 2.2 Στατιστικά χαρακτηριστικά των SLA που προέκυψαν από πρόγνωση με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής των πρωτογενών δεδομένων της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2.....	23
Πίνακας 2.3 Στατιστικά χαρακτηριστικά των SLA που προέκυψαν από πρόγνωση με τη μέθοδο της διγραμμικής παρεμβολής των πρωτογενών δεδομένων της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2.....	24
Πίνακας 2.4 Στατιστικά χαρακτηριστικά των SLA που προέκυψαν από πρόγνωση με τη μέθοδο της κυβικής παρεμβολής των πρωτογενών δεδομένων της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2	25
Πίνακας 2.5 Στατιστικά χαρακτηριστικά των SLA που προέκυψαν από πρόγνωση με τη μέθοδο σημειακής προσαρμογής των πρωτογενών δεδομένων της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2	26
Πίνακας 2.6 Στατιστικά χαρακτηριστικά των SLA που προέκυψαν από πρόγνωση με τη μέθοδο Kriging των πρωτογενών δεδομένων της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2	27
Πίνακας 2.7 Στατιστικά χαρακτηριστικά των SLA που προέκυψαν από πρόγνωση με τη μέθοδο πλησιέστερου σημείου των πρωτογενών δεδομένων της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2	28
Πίνακας 2.8 Στατιστικά χαρακτηριστικά ανωμαλιών βαρύτητας ελεύθερου αέρα για την περιοχή μελέτης	32

Πίνακας 2.9 Στατιστικά χαρακτηριστικά ανωμαλιών βαρύτητας ελεύθερου αέρα μόνο για τη θαλάσσια περιοχή μελέτης.....	33
Πίνακας 2.10 Στατιστικά χαρακτηριστικά του μοντέλου γεωειδούς για την περιοχή της Κρήτης.....	34
Πίνακας 4.1 Στατιστικά χαρακτηριστικά SLA από φασματικές τεχνικές.....	59
Πίνακας 4.2 Στατιστικά χαρακτηριστικά SLA από φασματικές τεχνικές μόνο για τη θαλάσσια περιοχή	60
Πίνακας 4.3 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου ΜΣΘ από πρόγνωση με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής	64
Πίνακας 4.4 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου ΜΣΘ από πρόγνωση με τη μέθοδο της διγραμμικής παρεμβολής.....	65
Πίνακας 4.5 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου ΜΣΘ από πρόγνωση με τη μέθοδο της κυβικής παρεμβολής	65
Πίνακας 4.6 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου ΜΣΘ από πρόγνωση με τη μέθοδο kriging.....	66
Πίνακας 4.7 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου ΜΣΘ από πρόγνωση με τη μέθοδο σημειακής προσαρμογής.....	67
Πίνακας 4.8 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου ΜΣΘ από πρόγνωση με τη μέθοδο πλησιέστερου σημείου	68
Πίνακας 4.9 Μοντέλο ΜΣΘ από πρόγνωση με τη μέθοδο I/O system	69
Πίνακας 4.10 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου ΜΣΘ από πρόγνωση με τη μέθοδο I/O system.....	69
Πίνακας 4.11 Μοντέλο ΜΣΘ από πρόγνωση μέσω GEOFOUR	70

Πίνακας 4.12 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου Μέσης Στάθμης Θάλασσας από πρόγνωση μέσω GEOFOUR	70
Πίνακας 4.13 Μοντέλο ΜΣΘ από πρόγνωση μέσω SPFOUR.....	71
Πίνακας 4.14 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου ΜΣΘ από πρόγνωση μέσω SPFOUR	71
Πίνακας 4.15 Στατιστικά χαρακτηριστικά της εσωτερικής ακρίβειας των μοντέλων Μέσης Στάθμης Θάλασσας.....	73
Πίνακας 4.16 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου γεωειδούς από πρόγνωση με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής	75
Πίνακας 4.17 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου γεωειδούς από πρόγνωση με τη μέθοδο της κυβικής παρεμβολής	76
Πίνακας 4.18 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου γεωειδούς από πρόγνωση με τη μέθοδο της διγραμμικής παρεμβολής	77
Πίνακας 4.19 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου γεωειδούς από πρόγνωση με τη σημειακής προσαρμογής.....	78
Πίνακας 4.20 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου γεωειδούς από πρόγνωση με τη μέθοδο Kriging	79
Πίνακας 4.21 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου γεωειδούς από πρόγνωση με τη μέθοδο πλησιέστερου σημείου	79
Πίνακας 4.22 Μοντέλο γεωειδούς από πρόγνωση με το σύστημα εισόδου-εξόδου.80	80
Πίνακας 4.23 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου γεωειδούς από πρόγνωση με το σύστημα εισόδου-εξόδου	80
Πίνακας 4.24 Μοντέλο γεωειδούς από πρόγνωση με το GEOFOUR (επίπεδη προσέγγιση)	81

Πίνακας 4.25 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου γεωειδούς από πρόγνωση με το GEOFOUR (επίπεδη προσέγγιση)	81
Πίνακας 4.26 Μοντέλο γεωειδούς από πρόγνωση με το SPFOUR (σφαιρική προσέγγιση)	82
Πίνακας 4.27 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου γεωειδούς από πρόγνωση με το SPFOUR (σφαιρική προσέγγιση).....	82
Πίνακας 4.28 Στατιστικά χαρακτηριστικά της εσωτερικής ακρίβειας των μοντέλων γεωειδούς	84
Πίνακας 4.29 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου Μέσης Δυναμικής Θαλάσσιας Τοπογραφίας (Rio).....	85
Πίνακας 4.30 Στατιστικά χαρακτηριστικά συγκρίσεων του μοντέλου της Κρήτης με τις διάφορες προσεγγίσεις του CRYOSAT-2	87
Πίνακας 4.31 Στατιστικά χαρακτηριστικά συγκρίσεων μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT- 2 με τη βαρυτημετρική λύση (JASON - 1, κύκλος 100, διάβαση 018)	93
Πίνακας 4.32 Στατιστικά χαρακτηριστικά συγκρίσεων μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT- 2 με τη βαρυτημετρική λύση (JASON - 1, κύκλος 100, διάβαση 109)	95
Πίνακας 4.33 Στατιστικά χαρακτηριστικά συγκρίσεων μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT- 2 με τη βαρυτημετρική λύση (JASON - 1, κύκλος 176, διάβαση 109)	97
Πίνακας 4.34 Στατιστικά χαρακτηριστικά συγκρίσεων μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT- 2 με τη λύση συνδυασμού (JASON - 2, κύκλος 174, διάβαση 018)	98
Πίνακας 4.35 Στατιστικά χαρακτηριστικά συγκρίσεων μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT- 2 με τη βαρυτημετρική λύση (JASON - 1, κύκλος 174, διάβαση 018)	100
Πίνακας 4.36 Στατιστικά χαρακτηριστικά συγκρίσεων μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT- 2 με τη λύση συνδυασμού (JASON - 2, κύκλος 176, διάβαση 109)	101

Πίνακας 4.37 Στατιστικά χαρακτηριστικά συγκρίσεων μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT-2 και της λύσης συνδυασμού (SARAL, κύκλος 176, διάβαση 571)	103
Πίνακας 4.38 Στατιστικά χαρακτηριστικά συγκρίσεων μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT - 2 με τη βαρυτημετρική λύση (SARAL, κύκλος 176, διάβαση 571)	104
Πίνακας 4.39 Στατιστικά χαρακτηριστικά των ανωμαλιών βαρύτητας για ολόκληρη την περιοχή μελέτης	106
Πίνακας 4.40 Στατιστικά χαρακτηριστικά των ανωμαλιών βαρύτητας για τη θαλάσσια περιοχή μελέτης	106
Πίνακας 4.41 Στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκρίσεων της βάσης της Κρήτης με τα παραχθέντα μοντέλα	110

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 Οι δορυφορικές αποστολές του προγράμματος "Εξερευνητές της Γης" της ESA (http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2012/11/ESA_s_Earth_Explorers_satellites).....	2
Εικόνα 1.2 Σχηματική απεικόνιση της αποστολής του δορυφόρου CRYOSAT-2 (http://news.bbc.co.uk/2/hi/8609428.stm).	4
Εικόνα 1.3 Το ίχνος τροχιάς (ground track) του CryoSat στην Αρκτική περιοχή (http://blogs.esa.int/cryosat-ice-blog/2011/04/18/keeping-cryosat-on-track/).....	5
Εικόνα 1.4 Ο δορυφορικός εξοπλισμός του CRYOSAT-2 (http://www.earth.esa.int) ..	6
Εικόνα 1.5 Ο CRYOSAT-2 μπορεί να παίρνει παρατηρήσεις στις άκρες των πάγων όπως αγγίζουν οριακά τη θάλασσα (τεχνική SAR) (http://www.earth.esa.int)	7
Εικόνα 1.6 Το ίχνος της εκπεμπόμενης δέσμης του radar χωρίζεται σε σειρές μπροστά και πίσω από το δορυφόρο. Καθώς ο δορυφόρος κινείται, εξαιτίας της σχετικής ταχύτητας η επιστρεφόμενη ενέργεια έχει αλλοιωμένη συχνότητα λόγω του φαινομένου Doppler (http://www.earth.esa.int)	11
Εικόνα 1.7 Sea Level Anomalies σε cm από συνδυασμό τεσσάρων αλτιμετρικών αποστολών JASON-2, CRYOSAT-2, ALTIKA και HY-2A. (http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/product-information/updates-and-reprocessing/ssaltoduacs-product-changes-and-updates.html)	14
Εικόνα 1.8 Χάρτης πάχους των πάγων που προέκυψε σε σχεδόν πραγματικό χρόνο (NRT) από τον CRYOSAT-2. (http://www.esa.int/esaLP/LPcryosat.html)	14
Εικόνα 2.1 Απεικόνιση της περιοχής μελέτης	19
Εικόνα 2.2 Κατανομή δεδομένων της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2.....	20

Εικόνα 2.3 Πλέγμα πρόγνωσης των δεδομένων της δορυφορικής αλτιμετρίας	21
Εικόνα 2.4 Απεικόνιση των SLA για την περιοχή μελέτης μετά τη γραμμική παρεμβολή.....	23
Εικόνα 2.5 Απεικόνιση των SLA για την περιοχή μελέτης μετά τη διγραμμική παρεμβολή.....	24
Εικόνα 2.6 Απεικόνιση των SLA για την περιοχή μελέτης μετά την κυβική παρεμβολή	25
Εικόνα 2.7 Απεικόνιση των SLA για την περιοχή μελέτης μετά την παρεμβολή με τη μέθοδο σημειακής προσαρμογής	26
Εικόνα 2.8 Απεικόνιση των SLA για την περιοχή μελέτης μετά την παρεμβολή με τη μέθοδο Kriging	27
Εικόνα 2.9 Απεικόνιση των SLA για την περιοχή μελέτης μετά την παρεμβολή με τη μέθοδο πλησιέστερου σημείου	28
Εικόνα 2.10 Υψόμετρα του γεωειδούς σε παγκόσμια κλίμακα από το EGM 2008 σε πλέγμα 2.5' (http://earth-info.nga.mil)	31
Εικόνα 2.11 Ανωμαλίες βαρύτητας ελεύθερου αέρα για την περιοχή μελέτης.....	32
Εικόνα 2.12 Ανωμαλίες βαρύτητας ελεύθερου αέρα μόνο για τη θαλάσσια περιοχή μελέτης	33
Εικόνα 2.13 Μοντέλο γεωειδούς για την περιοχή της Κρήτης	34
Εικόνα 2.14 Η Μέση Συνθετική Δυναμική Θαλάσσια Τοπογραφία στην περιοχή του Ιονίου. Με μπλε βέλη παριστάνονται τα αντίστοιχα μέσα ρεύματα (Rio et al. 2007)	36
Εικόνα 2.15 Υπολογίζεται η απόλυτη αλτιμετρική μέση στάθμη από (α) ένα μηδενικό πεδίο και (β) από τη SMDT χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της περιόδου Δεκεμβρίου	

2002 – Ιουνίου 2003. Με κόκκινη διαγράμμιση απεικονίζεται η τροχιά του πλωτήρα (Rio et al. 2007)	37
Εικόνα 3.1 Εμπειρική συνάρτηση συμμεταβλητότητας των υπολοίπων των ανωμαλιών βαρύτητας για βαθμό 1834	45
Εικόνα 3.2 Εμπειρική συνάρτηση συμμεταβλητότητας των υπολοίπων των ανωμαλιών βαρύτητας για βαθμό 2160	46
Εικόνα 3.3 Αναλυτική συνάρτηση συμμεταβλητότητας των υπολοίπων βαρύτητας για βαθμό 1834.....	47
Εικόνα 3.4 Αναλυτική συνάρτηση συμμεταβλητότητας των υπολοίπων βαρύτητας για βαθμό 2160.....	48
Εικόνα 3.5 Διάγραμμα ροής για την δημιουργία εμπειρικών και αναλυτικών συναρτήσεων συμμεταβλητότητας και πρόγνωση με ελάχιστα τετράγωνα	49
Εικόνα 3.6 Σύστημα εισόδου-εξόδου με θόρυβο (Τζιαβός 2002)	53
Εικόνα 3.7 Σύστημα διπλής εισόδου-απλής εξόδου (Τζιαβός 2002).....	55
Εικόνα 4.1 SLA από μέθοδο LSC για βαθμό 1834.....	61
Εικόνα 4.2 SLA από Geofour για βαθμό 2160	61
Εικόνα 4.3 SLA από SPFOUR για βαθμό 2160	62
Εικόνα 4.4 SLA από συνδυασμό SLA LSC και υπολοίπων των ανωμαλιών βαρύτητας από τη βάση της Κρήτης μέσω συστήματος εισόδου-εξόδου (I/O systems) για βαθμό 2160.....	62
Εικόνα 4.5 Μοντέλο ΜΣΘ από πρόγνωση γραμμικής παρεμβολής	63
Εικόνα 4.6 Μοντέλο ΜΣΘ από πρόγνωση διγραμμικής παρεμβολής	64
Εικόνα 4.7 Μοντέλο ΜΣΘ από πρόγνωση κυβικής παρεμβολής.....	65

Εικόνα 4.8 Μοντέλο ΜΣΘ από πρόγνωση με τη μέθοδο kriging	66
Εικόνα 4.9 Μοντέλο ΜΣΘ. από πρόγνωση με τη μέθοδο μέθοδο σημειακής προσαρμογής.....	67
Εικόνα 4.10 Μοντέλο ΜΣΘ από πρόγνωση με τη μέθοδο μέθοδο πλησιέστερου σημείου	68
Εικόνα 4.11 Μοντέλο γεωειδούς από πρόγνωση με τη μέθοδο γραμμικής παρεμβολής	74
Εικόνα 4.12 Μοντέλο γεωειδούς από πρόγνωση με τη μέθοδο κυβικής παρεμβολής	75
Εικόνα 4.13 Μοντέλο γεωειδούς από πρόγνωση με τη μέθοδο διγραμμικής παρεμβολής	76
Εικόνα 4.14 Μοντέλο γεωειδούς από πρόγνωση με τη μέθοδο σημειακής προσαρμογής.....	77
Εικόνα 4.15 Μοντέλο γεωειδούς από πρόγνωση με τη μέθοδο Kriging	78
Εικόνα 4.16 Μοντέλο γεωειδούς από πρόγνωση με τη μέθοδο πλησιέστερου σημείου	79
Εικόνα 4.17 Απεικόνιση της διαφοράς του γεωειδούς της Κρήτης με το μοντέλο διγραμμικής παρεμβολής της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2.....	88
Εικόνα 4.18 Απεικόνιση της διαφοράς του γεωειδούς της Κρήτης με το μοντέλο γραμμικής παρεμβολής της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2	88
Εικόνα 4.19 Απεικόνιση της διαφοράς του γεωειδούς της Κρήτης με το μοντέλο κυβικής παρεμβολής της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2	89
Εικόνα 4.20 Απεικόνιση της διαφοράς του γεωειδούς της Κρήτης με το μοντέλο σημειακής προσαρμογής της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2.....	89

Εικόνα 4.21 Απεικόνιση της διαφοράς του γεωειδούς της Κρήτης με το μοντέλο Kriging της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2	90
Εικόνα 4.22 Απεικόνιση της διαφοράς του γεωειδούς της Κρήτης με το μοντέλο πλησιέστερου σημείου της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2	90
Εικόνα 4.23 Απεικόνιση της διαφοράς του γεωειδούς της Κρήτης με το μοντέλο GEOFOUR της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2	91
Εικόνα 4.24 Τροχιά δορυφορικής αποστολής Jason - 1, κύκλος 100, διάβαση 018 ..	93
Εικόνα 4.25 Τροχιά δορυφορικής αποστολής JASON-1, κύκλος 100, διάβαση 109...	95
Εικόνα 4.26 Τροχιά δορυφορικής αποστολής JASON-1, κύκλος 176, διάβαση 109...	96
Εικόνα 4.27 Τροχιά δορυφορικής αποστολής JASON-2, κύκλος 174, διάβαση 018...98	
Εικόνα 4.28 Τροχιά δορυφορικής αποστολής JASON-2, κύκλος 174, διάβαση 018...99	
Εικόνα 4.29 Τροχιά δορυφορικής αποστολής JASON-2, κύκλος 176, διάβαση 109.101	
Εικόνα 4.30 Τροχιά δορυφορικής αποστολής SARAL, κύκλος 176, διάβαση 571102	
Εικόνα 4.31 Τροχιά δορυφορικής αποστολής SARAL, κύκλος 176, διάβαση 571104	
Εικόνα 4.32 Υπόλοιπα των ανωμαλιών βαρύτητας μέσω προσαρμογής από πρωτογενή SLA για βαθμό 2160.....	108
Εικόνα 4.33 Υπόλοιπα των ανωμαλιών βαρύτητας μέσω προσαρρμογής από πρωτογενή SLA για βαθμό 1834.....	108
Εικόνα 4.34 Υπόλοιπα των ανωμαλιών βαρύτητας μέσω GEOFOUR από SLA LSC για βαθμό 1834.....	109
Εικόνα 4.35 Υπόλοιπα των ανωμαλιών βαρύτητας μέσω GEOFOUR από SLA LSC για βαθμό 2160.....	109

Εικόνα 4.36 Υπόλοιπα των ανωμαλιών βαρύτητας από τη βάση για την Κρήτη για βαθμό 2160.....	110
--	-----

Συντομογραφίες

CNES	Centre National d' Etudes Spatiales
DTU10	Denmark Technical University 2010
EGM2008	Earth Gravitational Model 2008
ERS	European Remote Sensing Satellite
ESA	European Space Agency
FFT	Fast Fourier Transform
IfE	Institut für Erdmessung
GEOSAT	GEOdetic SATellite
GRS80	Geodetic Reference System 1980
ICE SAT	ICE SATellite
LSC	Least Squares Collocation
LRR	Laser Retro-Reflectors
MDT	Mean Dynamic Topography
MSS	Mean Sea Surface
RA	Radar Altimeter
SAR	Synthetic Aperture Radar
SLA	Sea Level Anomaly
SLR	Satellite Laser Ranging
SSH	Sea Surface Height
SST	Sea Surface Topography
WGS84	World Geodetic System 1984

ΑΠΘ	Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
ΓΥΣ	Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού
ΜΣΘ	Μέση Στάθμη Θάλασσας
ΤΑΤΜ	Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών

1. Εισαγωγή – Αντικείμενο Μελέτης

1.1. Η δορυφορική αποστολή Cryosat-2

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα του 21^{ου} αιώνα το οποίο τείνει να καταλάβει την πρώτη θέση ανάμεσα στα άλλα είναι αυτό της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής. Για το λόγο αυτό έχουν ξεκινήσει προσπάθειες σε διεθνές επίπεδο με σκοπό τη λεπτομερή παρατήρηση και μελέτη των περιβαλλοντικών αλλαγών που συντελούνται, ώστε να καταστεί δυνατή η πρόβλεψη των επιπτώσεων στον πλανήτη και κατά συνέπεια η αντιμετώπισή τους. Σε αυτήν την κατεύθυνση κινείται και η Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA) από τη δεκαετία του 1970 με την αποστολή του METEOSAT και άλλων μεταγενέστερων δορυφόρων, όπως ο ERS-1, ERS-2, ENVISAT κ.ά. Τα αποτελέσματα των δορυφορικών αποστολών αξιοποιούνται από τη διεθνή κοινότητα και συνεισφέρουν στην κατανόηση του συστήματος Γη και των αλλαγών που συντελούνται σε αυτό. Οι ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις για ακρίβεια οδηγούν στη δημιουργία νέων αποστολών και σε αυτήν την κατεύθυνση κινείται και η ESA (European Space Agency) με το πρόγραμμα Ζωντανός Πλανήτης (*Living Planet Programme*), το οποίο χρησιμοποιεί διάφορες δορυφορικές αποστολές με πολύ συγκεκριμένους σκοπούς και στόχους.

Το πρόγραμμα *Living Planet Programme* της ESA, που είναι αφιερωμένο στα θέματα παρακολούθησης του περιβάλλοντος, αποτελείται από δυο κύριες συνιστώσες, μια για τον ερευνητικό και επιστημονικό τομέα με τη μορφή αποστολών εξερεύνησης της Γης (*Earth Explorer Missions*), ενώ μία δεύτερη (*Earth Watch*) αφορά την παροχή των τελικών στοιχείων παρατήρησης για την χρησιμοποίησή τους από διάφορες υπηρεσίες (Χριστίδου 2014). Οι αποστολές *Earth Explorer* περιλαμβάνουν μια νέα στρατηγική παρατήρησης της Γης από το διάστημα. Έχουν ως θεμελιώδη στόχο την παροχή δεδομένων απαραίτητων για τη μελέτη των διαφόρων διαδικασιών του συστήματος Γη. Η στρατηγική αυτή έγκειται στο σχεδιασμό αποστολών με σκοπό να αντιμετωπίσουν συγκεκριμένα και κρίσιμα ζητήματα όπως ακριβώς τίθενται από την επιστημονική κοινότητα αξιοποιώντας πλήρως την εξέλιξη της τεχνολογίας στην

τεχνική των μετρήσεων. Οι σειρές των δορυφόρων αυτών των αποστολών σχεδιάζονται με βάση τα κρίσιμα περιβαλλοντολογικά ζητήματα, ώστε να συμβάλουν στην περαιτέρω κατανόηση του γήινου συστήματος. Οι αποστολές εστιάζονται στη μελέτη της ατμόσφαιρας, της βιόσφαιρας, της υδρόσφαιρας, της κρυόσφαιρας και το εσωτερικό της Γης, τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών των συνιστωσών καθώς και τις επιπτώσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας σε αυτές.



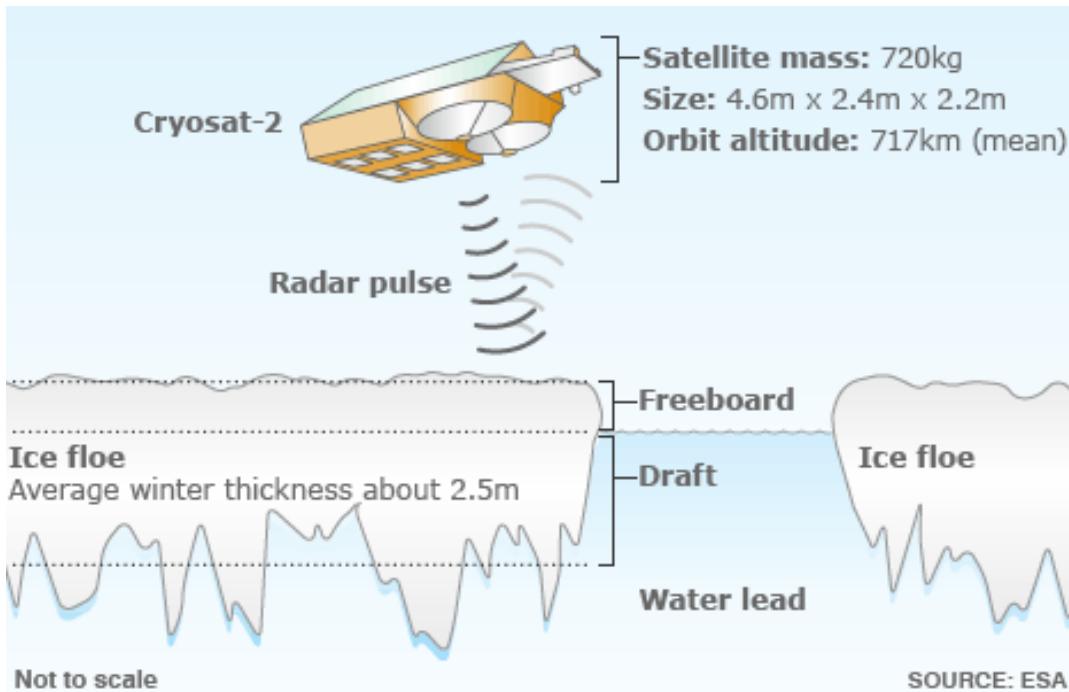
Εικόνα 1.1 Οι δορυφορικές αποστολές του προγράμματος "Εξερευνητές της Γης" της ESA (http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2012/11/ESA_s_Earth_Explorers_satellites)

Βασικός στόχος της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2 είναι η μελέτη της κρυόσφαιρας (Wingham 1999, Drinkwater et al. 2004, Wingham 2006). Η μελέτη, δηλαδή, του πάχους των πάγων σε παγκόσμια κλίμακα. Με την αποστολή αυτή η επιστημονική κοινότητα ανέμενε επιπλέον στοιχεία για την παγκόσμια κλιματική αλλαγή. Ακόμη, στόχος ήταν η ακριβής μέτρηση του ύψους και του όγκου των πάγων στην ηπειρωτική Ανταρκτική και τη Γροιλανδία μέσα σε μια περίοδο τριών ετών, που ήταν ο προβλεπόμενος χρόνος διάρκειας ζωής της αποστολής (<http://www.esa.int/esaLP/LPcryosat.html>).

Τα αποτελέσματα προάγουν την κατανόηση της σχέσης ανάμεσα στους πολικούς πάγους και το παγκόσμιο κλίμα. Οι παγωμένες εκτάσεις της Γης διαδραματίζουν πρωτεύοντα ρόλο στην κλιματική ισορροπία και η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί το λιώσιμο των παγωμένων όγκων και αύξηση της θαλάσσιας στάθμης. Επίσης, η αποστολή CRYOSAT-2 χάρη στα προηγμένα όργανα που διαθέτει μπορεί να καταγράφει πολύ μικρές αλλαγές στο πάχος των πάγων, καθώς επίσης και μεταβολές στη στάθμη της θάλασσας με πολύ μεγάλες ακρίβειες. Οι επιστήμονες διαπίστωσαν ότι μπορεί να καταγράψει μετρήσεις πολύ κοντύτερα στις ακτές απ' ότι μέχρι τώρα ήταν δυνατόν.

Η δορυφορική αποστολή CRYOSAT-2, εκτοξεύθηκε στις 8 Απριλίου 2010 από το Baikonur του Καζακστάν με έναν διηπειρωτικό βαλλιστικό πύραυλο SS-18. Η αποστολή CRYOSAT-2 διαφέρει από κάθε προηγούμενη προσπάθεια μέτρησης του πάχους των πάγων. Η διαφορά έγκειται στο ότι προσφέρει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση της μεταβολής των πάγων στις δυο πολικές περιοχές. Αυτό δεν οφείλεται μόνο στα όργανα παρατήρησης με τα οποία είναι εξοπλισμένη αλλά και στην επιλογή της δορυφορικής τροχιάς. Το αλτίμετρο του CRYOSAT-2 μπορεί να αντιληφθεί το πεδίο βαρύτητας στην επιφάνεια του ωκεανού αποκαλύπτοντας τα χαρακτηριστικά του πυθμένα με διακριτική ικανότητα 5-10 km (Χριστίδου 2014). Σε πρόσφατες μελέτες, το 2012, στο Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας Scripps στο Σαν Ντιέγκο, διαπιστώθηκε ότι η ακρίβεια καθορισμού της απόστασης από τον CRYOSAT-2 είναι 1.4 φορές καλύτερη από αυτή του δορυφόρου GEOSAT και ERS-1.

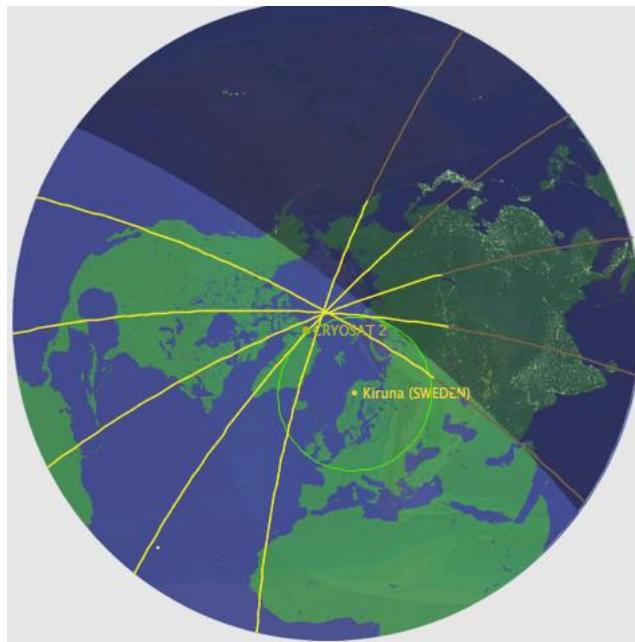
Τα περισσότερα δορυφορικά αλτίμετρα, όπως του JASON-2, ακολουθούν επαναλαμβανόμενα εδαφικά ίχνη κάθε 10 μέρες για την παρακολούθηση των αλλαγών στην τοπογραφία των ωκεανών που σχετίζονται με τα ωκεάνια ρεύματα και τις παλίρροιες. Ο μέσος όρος δεδομένων τριών έως τεσσάρων ετών του CRYOSAT-2 μπορεί να μειώσει το θόρυβο που οφείλεται σε ρεύματα και παλίρροιες και να βελτιώσει το διάγραμμα της μόνιμης τοπογραφίας που σχετίζεται με τη θαλάσσια βαρύτητα.



Εικόνα 1.2 Σχηματική απεικόνιση της αποστολής του δορυφόρου CRYOSAT-2 (<http://news.bbc.co.uk/2/hi/8609428.stm>).

Η τροχιά επιλέχθηκε πολική, μη ηλιοσύγχρονη με μέσο ύψος 717 Km, σε κλίση 92° και διαγράφεται πανομοιότυπη επανάληψη της τροχιάς με τροχιακό κύκλο 369 ημερών. Η τροχιά δεν είναι ηλιοσύγχρονη, σε αντίθεση με τους τηλεπισκοπικούς δορυφόρους που συνήθως ακολουθούν ηλιοσύγχρονη τροχιά, με συνέπεια να έχουμε μετατόπισή της σε όλες τις γωνίες του ήλιου σε διάστημα 8 μηνών (<http://www.esa.int/esaLP/LPcryosat.html>).

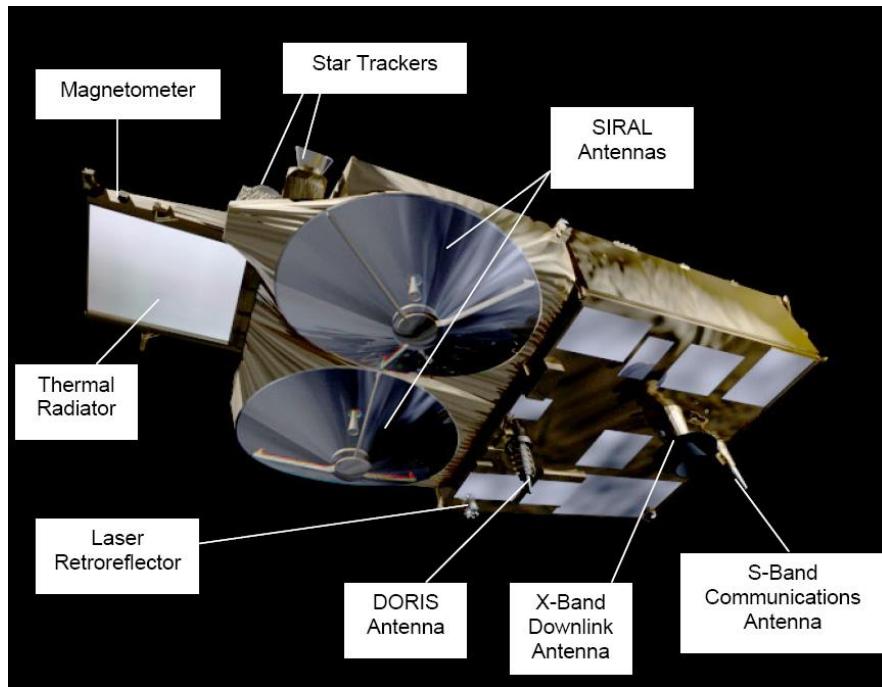
Βέβαια αυτό έχει ως συνέπεια ο δορυφόρος να είναι εκτεθειμένος στην πλήρη ενέργεια του ήλιου για κάποιο διάστημα ή να παραμένει ο μισός στην σκιά της Γης επί εβδομάδες. Η διάρκεια ζωής της αποστολής θα είναι τουλάχιστον τρία χρόνια. Τον έλεγχο και σχεδιασμό της αποστολής έχει το κέντρο δορυφορικών επιχειρήσεων της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος στο Ντάρμσταντ της Γερμανίας (ESA's European Satellite Operations Centre (ESOC) in Darmstadt, Germany).



Εικόνα 1.3 Το ίχνος τροχιάς (ground track) του CryoSat στην Αρκτική περιοχή (<http://blogs.esa.int/cryosat-ice-blog/2011/04/18/keeping-cryosat-on-track/>)

Ο δορυφορικός εξοπλισμός

Η δορυφορική αποστολή του CRYOSAT-2 σχεδιάστηκε με σκοπό να μην υπάρξουν βελτιώσεις στα όργανα του σκάφους, καθώς κάτι τέτοιο θα ήταν δαπανηρό και από άποψη χρημάτων αλλά και από άποψη χρόνου. Παρ' όλα αυτά το βασικό όργανο του δορυφόρου βελτιώθηκε σημαντικά. Το κύριο όργανο του CRYOSAT-2 είναι ένα εξελιγμένο ραντάρ – αλτίμετρο (SIRAL), το οποίο έχει μεγαλύτερες δυνατότητες σε σχέση με τα αλτίμετρα παλαιότερων αποστολών με σκοπό τη μέτρηση του πάχους των πάγων και του ύψους των εξάλων δηλ. το μέρος του πάγου πάνω από την ίσαλο γραμμή. Τα υπόλοιπα όργανα στοχεύουν στον ακριβή προσδιορισμού της τροχιάς και στη διαχείριση από το επίγειο τμήμα ελέγχου.



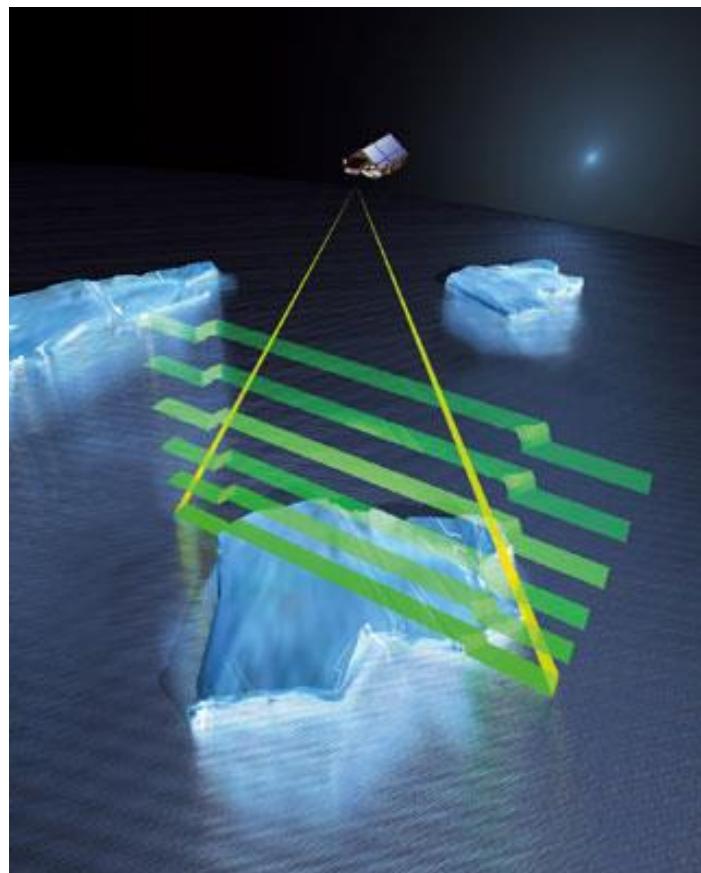
Εικόνα 1.4 Ο δορυφορικός εξοπλισμός του CRYOSAT-2 (<http://www.earth.esa.int>)

Το αλτίμετρο SIRAL

Στο παρελθόν τα ραντάρ αλτίμετρα περιορίζονταν να δίνουν αποτελέσματα στη θάλασσα και στις μεγάλες ομογενείς επιφάνειες πάγων. Το SIRAL ενσωματώνει τις εξελίξεις στις τεχνικές ραντάρ ώστε να βελτιώσει την ανάλυση των δεδομένων και να καλύψει τα κενά των μετρήσεων από τις προηγούμενες αποστολές. Έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει λεπτομερή δεδομένα από πάγους του εδάφους με ανώμαλο τοπογραφικό ανάγλυφο και να λαμβάνει μετρήσεις στις άκρες των πάγων καθώς αγγίζουν οριακά τη θάλασσα. Το SIRAL αποτελεί μια εξέλιξη που βασίστηκε στο Γαλλικό αλτίμετρο Poseidon της αποστολής TOPEX/POSEIDON και στο αλτίμετρο της αποστολής JASON. Το νέο βελτιωμένο ραντάρ – αλτίμετρο SIRAL του CRYOSAT-2 είναι βάρους 70 kg και εκπέμπει στη ζώνη Ku-band (13.7 GHz). Το SIRAL προσφέρει τρεις λειτουργίες με διαφορετική λύση, ανάλογα με την επεξεργασία των μετρήσεων, για τις διαφορετικές περιπτώσεις πάγων (<http://www.esa.int/esaLP/LPcryosat.html>).

Οι τρεις λειτουργίες είναι οι εξής:

- Πάνω από τις σχετικά επίπεδες περιοχές στο εσωτερικό των πάγων ή και στις παρατηρήσεις στις θαλάσσιες περιοχές μπορεί να λειτουργεί ως κανονικό ραντάρ αλτίμετρο με εκπομπή περιορισμένων παλμών (*pulse-limited*), γνωστή ως μέθοδος χαμηλής ανάλυσης (*Low Resolution Mode, LRM*).
- Με βάση την τεχνική ραντάρ συνθετικού ανοίγματος *SAR (Synthetic Aperture Radar)*.
- Εφαρμογή συμβολομετρίας *SARIn*, με τη χρήση μιας δεύτερης κεραίας. Εδώ σκόπιμα χρησιμοποιείται ο όρος *SARIn (SAR Interferometric)*, έναντι του ευρέως χρησιμοποιούμενου στη βιβλιογραφία *InSAR* σε θέματα συμβολομετρίας απεικονίσεων SAR, για να δηλώσει τη διαφορά ότι είναι μια αλτίμετρική μέθοδος και δεν χρησιμοποιούνται απεικονίσεις ραντάρ.



Εικόνα 1.5 Ο CRYOSAT-2 μπορεί να παίρνει παρατηρήσεις στις άκρες των πάγων όπως αγγίζουν οριακά τη θάλασσα (τεχνική SAR) (<http://www.earth.esa.int>)

Ακρίβεια του SIRAL

Στο τέλος της αποστολής CRYOSAT-2 θα παραμένει μια υπολειπόμενη αβεβαιότητα $\bar{\sigma}_r$ στην ακρίβεια των υψομέτρων των πάγων ως αποτέλεσμα της περιορισμένης διάρκειας των μετρήσεων. Για αυτό η αποστολή σχεδιάστηκε με τη βασική προϋπόθεση η αβεβαιότητα των μετρήσεων $\bar{\sigma}_m$ στο τέλος των μετρήσεων να μην υπερβεί το 10% της φυσικής μεταβλητότητας $\bar{\sigma}_n$ των μετρήσεων. Είναι:

$$\bar{\sigma}_r^2 = \bar{\sigma}_n^2 + \bar{\sigma}_m^2 \quad (1.1)$$

όπου προκύπτει $\bar{\sigma}_r = 1.1\bar{\sigma}_n$.

Οι αρχικές προδιαγραφές για την ακρίβεια ($\bar{\sigma}_r, \bar{\sigma}_m$) δίνονται στον παρακάτω πίνακα για κάθε λειτουργία του SIRAL και ανά επιφάνεια πάγων. Οι τιμές δίνονται σε cm ανά έτος υποθέτοντας μια κανονική διάρκεια ζωής 3 ετών (CryoSat Science and Mission Requirements, 1999, ESA/UCL).

cm/yr	Πάγοι της θάλασσας	Εσωτερικό των πάγων	Άκρα των πάγων (ανώμαλο ανάγλυφο)
$\bar{\sigma}_r$	3.5	0.76	8.3
$\bar{\sigma}_m$	1.6	0.17	3.3
Λειτουργία SIRAL	SAR	LRM	SARIn

Πίνακας 1.1 Ακρίβειες του SIRAL

Το σύστημα DORIS (Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite)

Βασική προϋπόθεση είναι ο ακριβής προσδιορισμός της δορυφορικής τροχιάς του CRYOSAT-2. Απαιτείται η γνώση της θέσης του δορυφόρου για κάθε χρονική στιγμή παρατηρήσεων του αλτιμέτρου SIRAL. Για το σκοπό αυτό ο δορυφόρος είναι

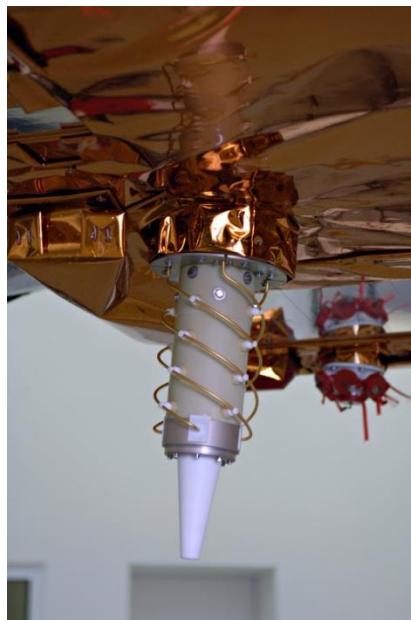
εξοπλισμένος με ένα δέκτη του συστήματος DORIS, παρόμοιο με το δέκτη του δορυφόρου ENVISAT. Το σύστημα DORIS (*Doppler Orbit and Radio positioning Integration by Satellite*) είναι το σύγχρονο σύστημα μετρήσεων που βασίζεται στη μέτρηση της αλοιώσης της συχνότητας λόγω του φαινομένου Doppler. Το σύστημα αναπτύχθηκε από το Εθνικό Κέντρο Διαστημικών Μελετών (CNES) της Γαλλίας και στηρίζεται σε ένα παγκόσμιο δίκτυο πομπών που αποτελείται από 50 φάρους (*beacons*). Ο δέκτης που βρίσκεται πάνω στο δορυφόρο λαμβάνει σήματα από τους φάρους και εκτελεί προσδιορισμούς της ταχύτητας της μεταβολής της απόστασης κάθε 10 δευτερόλεπτα. Οι μετρήσεις γίνονται σε δύο συχνότητες, μία στα 2.0365 GHz για ακριβείς μετρήσεις και σε μια μικρότερη στα 401.25 MHz, η οποία είναι περισσότερο ευαίσθητη ως προς τον προσδιορισμό της ιονοσφαιρικής διόρθωσης. Το σήμα που εκπέμπεται από τους φάρους μεταφέρει και ένα μήνυμα δεδομένων (στη συχνότητα των 401.25 MHz), τα οποία περιλαμβάνουν τον αριθμό αναγνώρισης, μετεωρολογικά στοιχεία και στοιχεία για την κατάσταση της λειτουργίας του φάρου. Οι θέσεις των φάρων είναι γνωστές με μεγάλη ακρίβεια στο διεθνές Επίγειο Σύστημα Αναφοράς (ITRS). Η ακριβής δορυφορική τροχιά είναι διαθέσιμη με ακρίβεια καλύτερη των 5cm ως προς το διάνυσμα θέσης, με καθυστέρηση 1 μήνα περίπου, ενώ σε πραγματικό χρόνο παρέχει ακρίβεια περίπου 0.5m.

Στην περίπτωση του CRYOSAT-2 χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες υπηρεσίες DORIS:

- ✓ επί του σκάφους:
 - καθορισμός της τροχιάς σε πραγματικό χρόνο για έλεγχο της τροχιάς και της θέσης του σκάφους
 - εφοδιασμός του οργάνου SIRAL με ένα ακριβές σήμα αναφοράς 10 MHz.
 - ακριβής προσδιορισμός χρόνου αναφοράς με βάση τον Διεθνή Ατομικό Χρόνο (IAT)
- ✓ κατόπιν αποθήκευσης και κατερχόμενης ζεύξης με τη Γη:

- καθορισμός ακριβούς τροχιάς
- παροχή ιονοσφαιρικών μοντέλων

Η Διεθνής Υπηρεσία Απόστασης Laser (ILRS) προσφέρει παρακολούθηση από το δικό της παγκόσμιο δίκτυο σταθμών laser για την υποστήριξη της αποστολής.

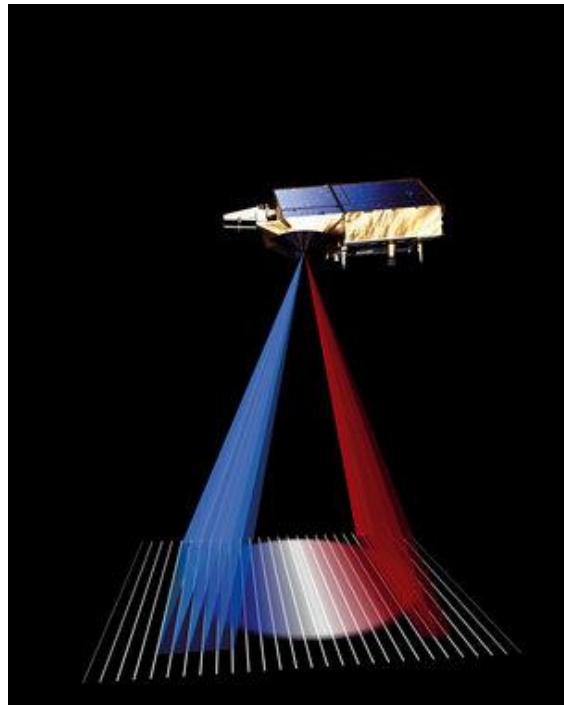


Πίνακας 1.2 Ο δέκτης του συστήματος DORIS (<http://www.earth.esa.int>)

Ανακλαστήρας laser (Laser Retro Reflector – LRR)

Ο ανακλαστήρας laser είναι μια παθητική οπτική συσκευή, η οποία αντανακλά υπεριώδεις ακτινοβολίες laser υψηλής ισχύος, που εκπέμπονται από τους επίγειους σταθμούς και σκοπός του είναι ο καθορισμός και η ακριβής μέτρηση της τροχιάς του δορυφόρου. Χρησιμοποιείται σε αρκετούς Ευρωπαϊκούς, Αμερικανικούς και Ρωσικούς δορυφόρους εδώ και χρόνια. Είναι προσαρμοσμένος στην πλάκα ναδίρ του δορυφόρου, με καλή ορατότητα προς τη Γη για να επιτρέπει τη λειτουργία σε γωνίες ύψους πάνω από 20° για όλα τα αζιμούθια. Λαμβάνοντας υπόψη την υψηλή ακρίβεια των μετρήσεων τοποθετείται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο κέντρο βαρύτητας του δορυφόρου για την αποφυγή σφαλμάτων στις μετρήσεις λόγω της

δορυφορικής κίνησης. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στη μέτρηση, στο έδαφος, του χρόνου μίας πλήρους διαδρομής παλμών λέιζερ που ανακλώνται σε συστοιχία πρισμάτων τοποθετημένων στην πλευρά του δορυφόρου, που είναι στραμμένη προς τη Γη. Τα πρίσματα έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να ανακλούν την προσπίπτουσα δέσμη laser απευθείας, καθιστώντας την ανακλώμενη δέσμη παράλληλη προς την προσπίπτουσα δέσμη εντός τόξου μερικών δευτερολέπτων.



Εικόνα 1.6 Το ίχνος της εκπεμπόμενης δέσμης του radar χωρίζεται σε σειρές μπροστά και πίσω από το δορυφόρο. Καθώς ο δορυφόρος κινείται, εξαιτίας της σχετικής ταχύτητας η επιστρεφόμενη ενέργεια έχει αλλοιωμένη συχνότητα λόγω του φαινομένου Doppler (<http://www.earth.esa.int>)

Ανιχνευτής Αστέρων (Star Tracker)

Για τη λειτουργία του SIRAL απαιτείται η γνώση του προσανατολισμού της βάσης των δύο κεραιών. Ο ακριβής προσδιορισμός του προσανατολισμού έχει βασική σημασία ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια στις μετρήσεις. Ο ανιχνευτής αστέρων είναι το κύριο μέσο καθορισμού του προσανατολισμού της συμβολομετρικής βάσης του SIRAL. Είναι επίσης ο κύριος αισθητήρας τριών αξόνων για τη μέτρηση θέσης κατά την ονομαστική κατάσταση λειτουργίας. Είναι μία

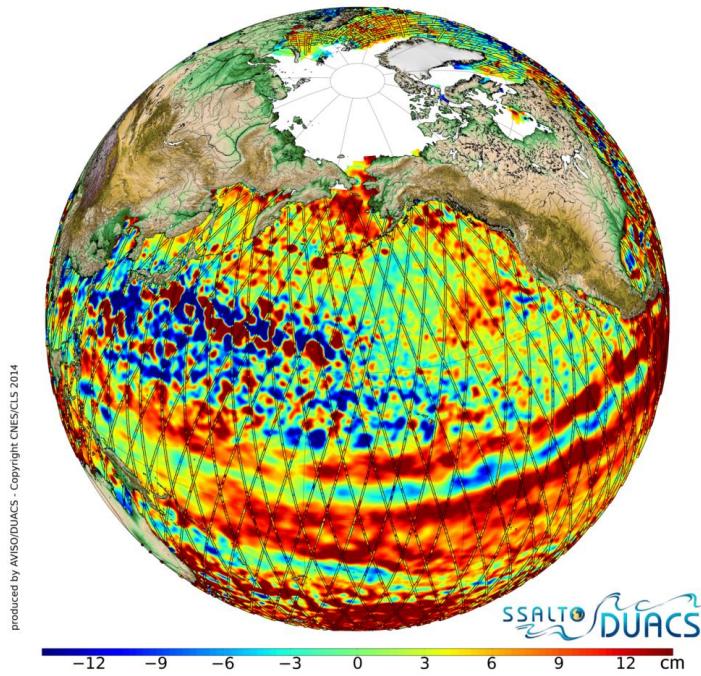
συσκευή χαμηλού βάρους, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και πλήρους αυτονομίας, ικανής να παρέχει υψηλής ακρίβειας μετρήσεις αδρανειακής θέσης, για τον προσδιορισμό τελικά της θέσης του σκάφους. Και οι τρεις ανιχνευτές αστέρων είναι τοποθετημένοι στον εκτεθειμένο στο διάστημα χώρο του ωφέλιμου φορτίου της κεραίας του δορυφόρου, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η δομική σταθερότητα μεταξύ των αισθητήρων αστέρων και του πλαισίου της κεραίας. Κάθε ένα από τα τρία συστήματα περιέχει μία ηλεκτρονική κάμερα που λαμβάνει πέντε φωτογραφίες ανά δευτερόλεπτο και οι οποίες αναλύονται από έναν ενσωματωμένο υπολογιστή και συγκρίνονται με έναν κατάλογο θέσης αστέρων.

Γεωδαιτικές εφαρμογές

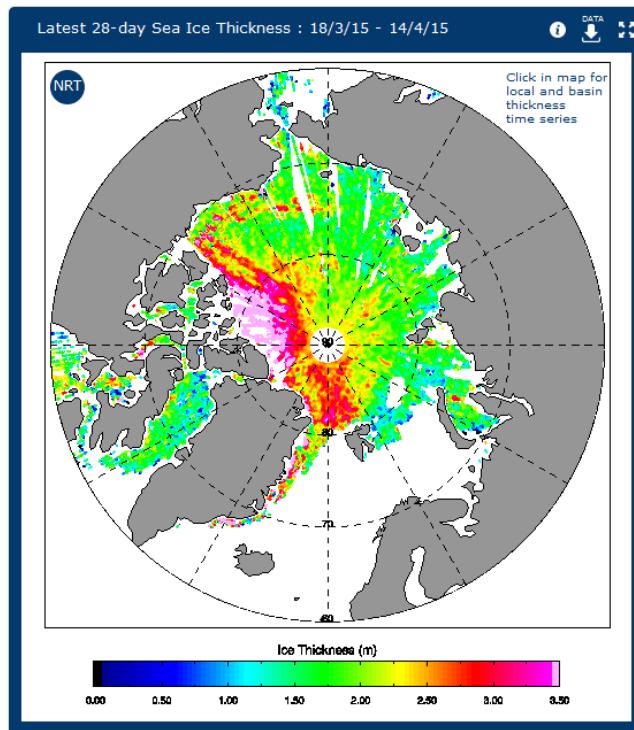
Βλέποντας τα οφέλη της αποστολής CRYOSAT-2 πέρα από το κύριο σκοπό της που αφορά τις αλλαγές στο πάχος των πάγων, παρατηρούμε ότι είναι από τις πρώτες, μαζί με τις αποστολές ICESAT και GRACE, που θα συγκεντρώσει παρατηρήσεις από περιοχές που στο παρελθόν αποτελούσαν ένα κενό από άποψη μετρήσεων ή έχουμε ελάχιστα δεδομένα. Αυτές είναι οι κεντρικές πολικές περιοχές και γενικότερα οι περιοχές με υψηλά γεωδαιτικά πλάτη που πλησιάζουν τις 90° και είναι μέχρι τώρα σχετικά απρόσιτες περιοχές. Ο CRYOSAT-2 καλύπτοντας περιοχές με πλάτος που φτάνει τις 88° , θα δώσει παρατηρήσεις σε αυτές τις περιοχές καλύπτοντας έτσι ένα σημαντικό κενό. Αυτές οι επιπρόσθετες μετρήσεις θα συνεισφέρουν στα μείζονα γεωδαιτικά προβλήματα σε σφαιρική κλίμακα συμπληρώνοντας τα δορυφορικά δεδομένα που έχουμε μέχρι τώρα. Η συμπλήρωση αυτή μπορεί να γίνει με σκοπό τη βελτίωση των παγκόσμιων μοντέλων βαρύτητας και την πλήρη χαρτογράφηση των πολικών περιοχών. Η ανάλυση των αλτιμετρικών δεδομένων του SIRAL επιτρέπει τον προσδιορισμό του ανάγλυφου των πολικών περιοχών. Η ανάλυση των παρατηρήσεων της τροχιάς του δορυφόρου, που είναι μια μέθοδος μοντελοποίησης του πεδίου βαρύτητας που εφαρμόστηκε επιτυχώς στο παρελθόν, μπορεί να συνεισφέρει στα γεωδυναμικά μοντέλα με δεδομένα για τις πολικές περιοχές που δεν έχουμε μετρήσεις στο παρελθόν.

Η συστηματική παρατήρηση του πάχους των πάγων θα συντελέσει στη πρόβλεψη της διακύμανσης της μέσης στάθμης της θάλασσας σε παγκόσμιο επίπεδο, η οποία αναμένεται να έχει έντονες αλλαγές τα επόμενα χρόνια με σημαντική άνοδο. Το γεγονός αυτό θα επιφέρει πρόσθετες αλλαγές με την παγκόσμια ανακατανομή των θαλάσσιων μαζών και η παρακολούθησή τους με γεωδαιτικές μετρήσεις καθίσταται απαραίτητη. Ο προσδιορισμός της μέσης στάθμης θάλασσας είναι ένα σημαντικό μέγεθος για τις γεωδαιτικές μεθόδους που αποτελεί μια παραδοσιακή αφετηρία για τα ορθομετρικά υψόμετρα. Η έντονη αλλαγή στη μέση στάθμη θα επηρεάσει τα μοντέλα παλίρροιας, που βασίζονται στη διαχρονική μέτρηση της στάθμης της θάλασσας για να προσδιοριστούν και οι μεγαλύτερες περιοδικά συνιστώσες που επιδρούν στο φαινόμενο της παλίρροιας. Η τήξη των πάγων θα υπεισέλθει ως επιπρόσθετο φαινόμενο στις μετρήσεις.

Ο CRYOSAT-2 από γεωδαιτική σκοπιά μπορεί να θεωρηθεί ένας αλτιμετρικός δορυφόρος εξοπλισμένος με ένα βελτιωμένο ραντάρ αλτίμετρο που πλεονεκτεί έναντι των προηγούμενων αλτιμετρικών δορυφόρων. Το SIRAL είναι εφικτό να συλλέξει δεδομένα από περιοχές που τα συμβατικά αλτίμετρα αδυνατούν. Εκτός από τις επιπλέον περιοχές που καλύπτει, μέχρι τις 88° , λαμβάνει μετρήσεις στα όρια πάγων και θάλασσας ενώ τα κανονικά αλτίμετρα δεν μπορούν να δώσουν τέτοιες παρατηρήσεις. Ο CRYOSAT-2 χρησιμοποιείται για την ενοποίηση των αλτιμετρικών δεδομένων με την τροχιά του δορυφόρου ENVISAT, ο οποίος παρόμοια είχε ενοποιήσει την τροχιά του με το δορυφόρο ERS-2 που αποτέλεσε το διάδοχό του.



Εικόνα 1.7 Sea Level Anomalies σε cm από συνδυασμό τεσσάρων αλτιμετρικών αποστολών JASON-2, CRYOSAT-2, ALTIKA και HY-2A. (<http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/product-information/updates-and-reprocessing/ssaltoduacs-product-changes-and-updates.html>)



Εικόνα 1.8 Χάρτης πάχους των πάγων που προέκυψε σε σχεδόν πραγματικό χρόνο (NRT) από τον CRYOSAT-2. (<http://www.esa.int/esaLP/LPcryosat.html>)

1.2. Στόχοι της εργασίας

Τις δύο τελευταίες δεκαετίες, η επιστήμη της Γεωδαισίας και οι γεωεπιστήμες, γενικότερα, έχουν πραγματοποιήσει σημαντικά βήματα στην περιγραφή, προσέγγιση και προσδιορισμό του πεδίου βαρύτητας της Γης και των συνιστώσων του. Πρωτεύοντα ρόλο σε αυτή τη ραγδαία ανάπτυξη διαδραματίζει μια δορυφορική τεχνική, η δορυφορική αλτιμετρία, η οποία συμβάλλει σε σημαντικό βαθμό στην ακριβή προσέγγιση του πεδίου βαρύτητας στις θαλάσσιες και ωκεάνιες περιοχές του πλανήτη. Ο υπολογισμός ενός θαλάσσιου γεωειδούς είναι επιβεβλημένος και ιδιαίτερα χρήσιμος, αν αναλογιστεί κανείς ότι με τις κλασικές γεωδαιτικές τεχνικές προσδιορισμού του γεωειδούς δεν μπορούν να ληφθούν τιμές στις θαλάσσιες περιοχές. Για τη μελέτη μοντέλων Μέσης Στάθμης Θάλασσας (ΜΣΘ) και γεωειδούς, με μεγάλη ακρίβεια σήμερα, σημαντικό ρόλο παίζουν τα διαθέσιμα δεδομένα από τις πρόσφατες αλτιμετρικές αποστολές παρακολούθησης της κατάστασης και των ιδιοτήτων των ωκεανών της Γης, τα οποία έχουν πλέον δημιουργήσει μία μεγάλη βάση δεδομένων δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για λύσεις του πεδίου βαρύτητας της Γης στις θαλάσσιες περιοχές. Με τέτοιες δορυφορικές αποστολές, όπως του ERS-1, ERS-2, ENVISAT, JASON-1, JASON-2, TOPEX/POSEIDON, CRYOSAT-2, CHAMP και GRACE κατέστη δυνατή η χαρτογράφηση της υδρόσφαιρας, η καταγραφή των ιδιοτήτων του θαλάσσιου περιβάλλοντος και η διαχρονική μελέτη του πεδίου βαρύτητας. Το ενδιαφέρον της δορυφορικής αυτής τεχνολογίας για τη Γεωδαισία και το πεδίο βαρύτητας έγκειται στην περαιτέρω επεξεργασία των αλτιμετρικών δεδομένων, η οποία οδηγεί στον ακριβή προσδιορισμό των συνιστώσων του πεδίου βαρύτητας στις θαλάσσιες περιοχές, όπως είναι τα υψόμετρα του γεωειδούς, οι ανωμαλίες βαρύτητας και οι αποκλίσεις της κατακορύφου. Οι πρόσφατες αποστολές των δορυφόρων CHAMP και GRACE προσφέρουν ακρίβειες της τάξης των ± 10 cm για βαθμούς αρμονικής ανάπτυξης μέχρι 60-70.

Όπως αναφέρθηκε, κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη του πεδίου βαρύτητας της ευρύτερης περιοχής της Κρήτης με τη δημιουργία μοντέλων

γεωειδούς, ΜΣΘ και βαρύτητας από δεδομένα της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2. Η λεπτομερής αξιολόγησή τους με προϋπάρχοντα μοντέλα για την περιοχή από προγενέστερες μελέτες δίνει μία σημαντική γνώση για την ακρίβεια των δεδομένων του CRYOSAT-2. Η επιλογή της περιοχής αυτής έγινε, διότι παρουσιάζει ενδιαφέρον από γεωδυναμική, γεωφυσική και γεωδαιτική άποψη και παράλληλα υπάρχει ένας όγκος αξιόλογων σχετικών μελετών, οι οποίες ενδείκνυνται για συγκρίσεις με τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την παρούσα μελέτη.

Τα δεδομένα, ανωμαλίες της στάθμης της θάλασσας (Sea Level Anomalies - SLA), προέρχονται από το δορυφόρο CRYOSAT-2. Χρησιμοποιήθηκαν 17299 δεδομένα που καλύπτουν τη χρονική περίοδο 2010-2015. Εξετάζονται έξι διαφορετικές μέθοδοι παρεμβολής που έγιναν σε πλέγμα 2 arcmin χρησιμοποιώντας όλα τα διαθέσιμα δεδομένα για τον προσδιορισμό μοντέλων γεωειδούς, ΜΣΘ και βαρύτητας. Η βασικότερη μέθοδος ήταν η σημειακή προσαρμογή (Least Squares Collocation – LSC) μέσω του λογισμικού GRAVSOFT (Tscherning et al. 1996).

Μετά τη δημιουργία των μοντέλων αυτών από τα πρωτογενή δεδομένα SLA, εξετάζεται η εσωτερική τους ακρίβεια, τόσο σε θαλάσσιες περιοχές όσο και στη συνολική περιοχή μελέτης. Κατόπιν, γίνεται σύγκριση με άλλες σχετικές μελέτες για την περιοχή όσον αφορά τα μοντέλα βαρύτητας και γεωειδούς (Τζιαβός et al. 2013, Μερτίκας et al. 2013). Οι συγκρίσεις εξωτερικής ακρίβειας συνεχίζονται με την αξιολόγηση των μοντέλων για τις οκτώ διαφορετικές προσεγγίσεις του γεωειδούς από δορυφορικές αποστολές, οι οποίες περιλαμβάνουν λύσεις βαρύτητας και αλτιμετρίας. Τα αποτελέσματα, οι απεικονίσεις, οι συγκρίσεις και οι λεπτομέρειες του κάθε μοντέλου και του τρόπου υπολογισμού του παρουσιάζονται εκτενώς στο 4^ο κεφάλαιο.

1.3. Διάρθρωση των περιεχομένων της εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία διαρθρώνεται σε πέντε κύρια κεφάλαια, τα οποία συνθέτουν τη συνολική μελέτη των δεδομένων της δορυφορικής αποστολής

του CRYOSAT-2, όσον αφορά τα γεωδυναμικά στοιχεία για την ευρύτερη περιοχή της Κρήτης.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρατίθενται τα στοιχεία της δορυφορικής CRYOSAT-2, πληροφορίες για το σκοπό, τα δεδομένα και την πορεία της. Επιπλέον, αναφέρονται εκτενώς οι στόχοι της παρούσας εργασίας, ο τρόπος προσέγγισής τους και προηγούμενες μελέτες στα διάφορα επιστημονικά πεδία που καλύπτει ο CRYOSAT-2. Τέλος, δίνεται η διάρθρωση των περιεχομένων με κάποια επιπλέον στοιχεία που περιέχονται στο κάθε κεφάλαιο.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται εκτενώς τα δεδομένα της δορυφορικής αποστολής του CRYOSAT-2 που χρησιμοποιούνται, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, οι αναγωγές, η επεξεργασία και τα τελικά δεδομένα που προκύπτουν. Σχολιάζεται επίσης αναλυτικά το γεωδυναμικό μοντέλο EGM2008 που χρησιμοποιείται στα αριθμητικά πειράματα της εργασίας. Επιπρόσθετα, γίνεται αναφορά σε μελέτες που έχουν προηγηθεί στην περιοχή μελέτης και σχετίζονται με δημιουργία μοντέλων βαρύτητας και γεωειδούς. Αναλυτικά παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα των μοντέλων αυτών, καθώς και οι γραφικές απεικονίσεις τους. Παρουσιάζεται, επίσης, το μοντέλο δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας (Rio et al. 2007) που χρησιμοποιείται στην πορεία της εργασίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές εφαρμογές της μελέτης. Η σημειακή προσαρμογή (LSC), οι φασματικές μέθοδοι (FFT) και τα συστήματα εισόδου-εξόδου παρουσιάζονται εκτενώς δίνοντας το μαθηματικό υπόβαθρο που χρησιμοποιείται σε κάθε στάδιο της μελέτης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο δίνονται τα μοντέλα ΜΣΘ και γεωειδούς, όπως προέκυψαν από τα δεδομένα της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2 και γίνεται η μεταξύ τους σύγκριση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι συγκρίσεις για τον προσδιορισμό της εξωτερικής ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Σχολιάζονται μοντέλα γεωειδούς από δεδομένα της βαρυτημετρικής λύσης και της λύσης συνδυασμού βαρύτητας και αλτιμετρίας κατά μήκος διαβάσεων δορυφορικών αποστολών. Επίσης,

παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα παραπάνω μοντέλα με ήδη υπάρχοντα μοντέλα για την περιοχή από προηγούμενες μελέτες. Ακόμη, μοντέλα βαρύτητας που προέκυψαν από την αποστολή CRYOSAT-2 συγκρίνονται με ήδη υπάρχοντα μοντέλα της περιοχής.

Στο πέμπτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκτενή αξιολόγηση των μοντέλων γεωειδούς, ΜΣΘ και βαρύτητας για την περιοχή μελέτης, καθώς και προτάσεις μελλοντικής έρευνας και περαιτέρω αξιολόγησης των προϊόντων της δορυφορικής αλτιμετρίας.

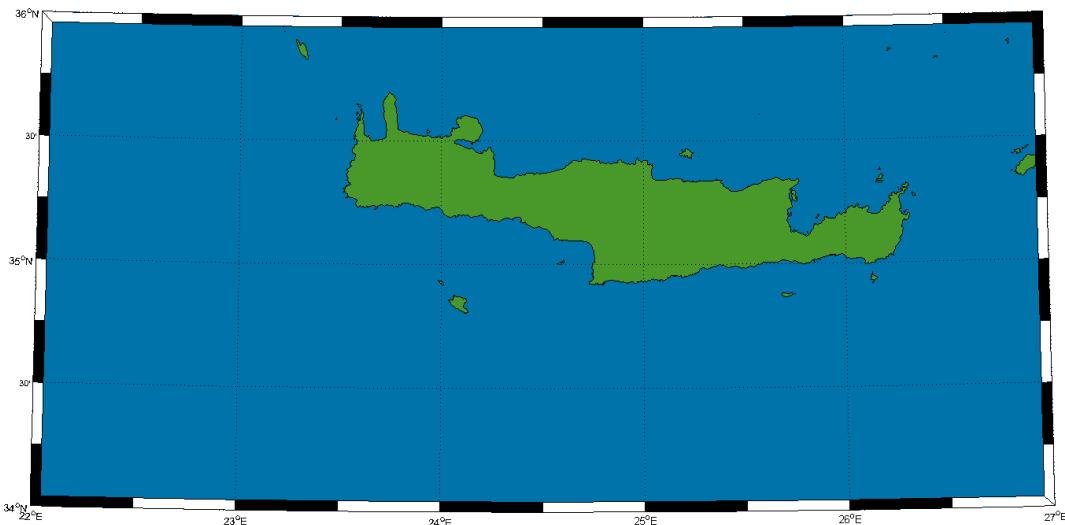
2. Δεδομένα – Επεξεργασία

2.1. Δεδομένα CRYOSAT-2

Η επεξεργασία των δεδομένων της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2 ακολουθεί το πρότυπο CRYOSAT-2 Processing Prototype (C2P), το οποίο αναπτύχθηκε από την ESA. Αρχικά, λαμβάνονται τα δεδομένα Level- 0 μέσω τηλεμετρίας από την ESA και ακολουθούν τα παρακάτω βήματα ώστε να παραχθούν τα δεδομένα Sea Level Anomalies (SLA) για κάθε αλτιμετρική μέτρηση (Mertz et al. 2013).

- Διαχωρισμός, χρονική (time-tagging) και χωρική τοποθέτηση των μετρήσεων.
- Υπολογισμός των διορθώσεων των οργάνων, καθώς και μετεωρολογικών και γεωφυσικών διορθώσεων.
- Εφαρμογή του MLE4 (Maximum Likelihood Estimator) Retracking αλγορίθμου και υπολογισμός των SLA.

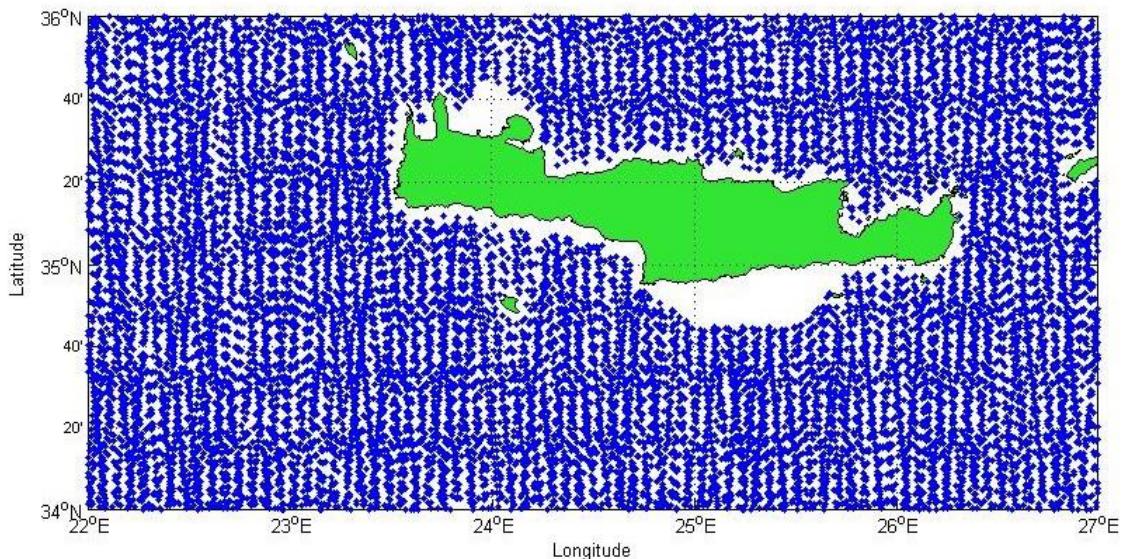
Τα δεδομένα της παρούσας εργασίας καλύπτουν την περιοχή $22^{\circ} \leq \lambda \leq 27^{\circ}$, $34^{\circ} \leq \varphi \leq 36^{\circ}$ (Εικόνα 2.1) και αποτελούνται από 17299 δεδομένα για έξι χρονιές, από το 2010 έως και το 2015, τα οποία περιλαμβάνουν τους κύκλους από 4 έως και 68.



Εικόνα 2.1 Απεικόνιση της περιοχής μελέτης

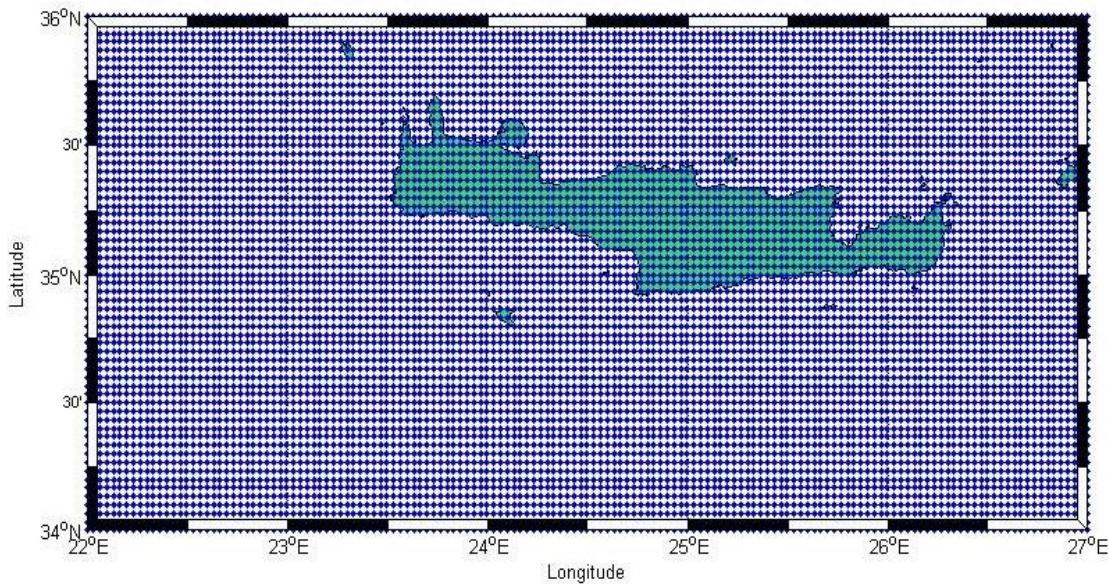
Τα δεδομένα του CRYOSAT-2 είναι διορθωμένα από όλα τα γεωφυσικά σφάλματα, εκτός από την αντίστροφη βαρομετρική επίδραση (local – global IB), την οποία θα διορθώσουμε κατά την επεξεργασία των δεδομένων. Ακόμη, τα δεδομένα είναι διορθωμένα από όλα τα σφάλματα που έχουν σχέση με το όργανο. Έχουμε, δηλαδή, τις διορθωμένες τιμές των SLA της αποστολής του δορυφόρου.

Στην εικόνα 2.2 παρουσιάζεται η κατανομή του συνόλου των δεδομένων, στην περιοχή μελέτης $22^{\circ} \leq \lambda \leq 27^{\circ}$, $34^{\circ} \leq \varphi \leq 36^{\circ}$, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του πλέγματος 2arcmin στο οποίο υπολογίσθηκαν όλα τα μοντέλα της εργασίας.



Εικόνα 2.2 Κατανομή δεδομένων της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2

Παρακάτω παρουσιάζεται το πλέγμα επάνω στο οποίο έγιναν όλες οι παρεμβολές των δεδομένων SLA για τη μελέτη του πεδίου βαρύτητας της περιοχής.



Εικόνα 2.3 Πλέγμα πρόγνωσης των δεδομένων της δορυφορικής αλτιμετρίας

2.2. Επεξεργασία – Αναγωγές

Για τον προσδιορισμό των μοντέλων γεωειδούς/ΜΣΘ και βαρύτητας χρησιμοποιήθηκαν έξι διαφορετικές μέθοδοι παρεμβολής των πρωτογενών δεδομένων SLA του CRYOSAT-2. Οι μέθοδοι παρεμβολής που υλοποιήθηκαν είναι οι ακόλουθες:

- i. Γραμμική (Linear)
- ii. Διγραμμική (Bilinear)
- iii. Κυβική (Cubic)
- iv. Πλησιέστερο σημείο (Nearest Neighbor)
- v. Kriging
- vi. Σημειακή προσαρμογή (LSC)

Για την υλοποίηση της μεθόδου LSC, αρχικά, τα πρωτογενή δεδομένα SLA προσεγγίζονται με μία εμπειρική συνάρτηση συμμεταβλητήτητας με το πρόγραμμα EMPCOV του GRAVSOFT, ώστε στη συνέχεια με τη χρήση του προγράμματος COVFIT

να υπολογιστεί η αναλυτική συνάρτηση συμμεταβλητότητας των δεδομένων (Αραμπέλος και Τζιαβός 2007). Στη συνέχεια, με τη χρήση του προγράμματος GEOCOL έγινε η πρόγνωση των τιμών SLA στο πλέγμα 2arcmin, αλλά και ανωμαλιών βαρύτητας ελεύθερου αέρα. Περισσότερα στοιχεία για τις συναρτήσεις συμμεταβλητότητας που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3.1.

Έχοντας τα πρωτογενή δεδομένα SLA σε όλη την περιοχή, αφού αφαιρέθηκαν όλα τα σφάλματα, συμπεριλαμβανομένων αυτών τις αντίστροφης βαρομετρικής επίδρασης (local IB – global IB), έγινε η πρόγνωση στις κορυφές του πλέγματος. Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι το πλέγμα θα αποτελείται από $61 \times 151 = 9211$ στοιχεία, αφού το βήμα είναι 2arcmin και το εύρος της περιοχής 2 μοίρες κατά γεωγραφικό πλάτος και 5 μοίρες κατά γεωγραφικό μήκος.

Με την δημιουργία των πλεγμάτων, τη χρήση του GEOCOL για τη δημιουργία μοντέλων βαρύτητας, τη χρήση του γεωδυναμικού μοντέλου EGM2008 και του μοντέλου της δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας (Rio et al. 2007) προέκυψαν οι προσεγγίσεις γεωειδούς, ΜΣΘ και βαρύτητας, όπως παρουσιάζονται στο 5^ο Κεφάλαιο.

Με τις μεθόδους παρεμβολής, αφού υπολογίσθηκαν οι τιμές των SLA στις κορυφές του πλέγματος, σχεδιάστηκαν τα αντίστοιχα γραφήματα με το λογισμικό MATLAB και εξήχθησαν τα στατιστικά στοιχεία που συνοδεύουν τα δεδομένα του κάθε γραφήματος.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των 17,299 δεδομένων της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2.

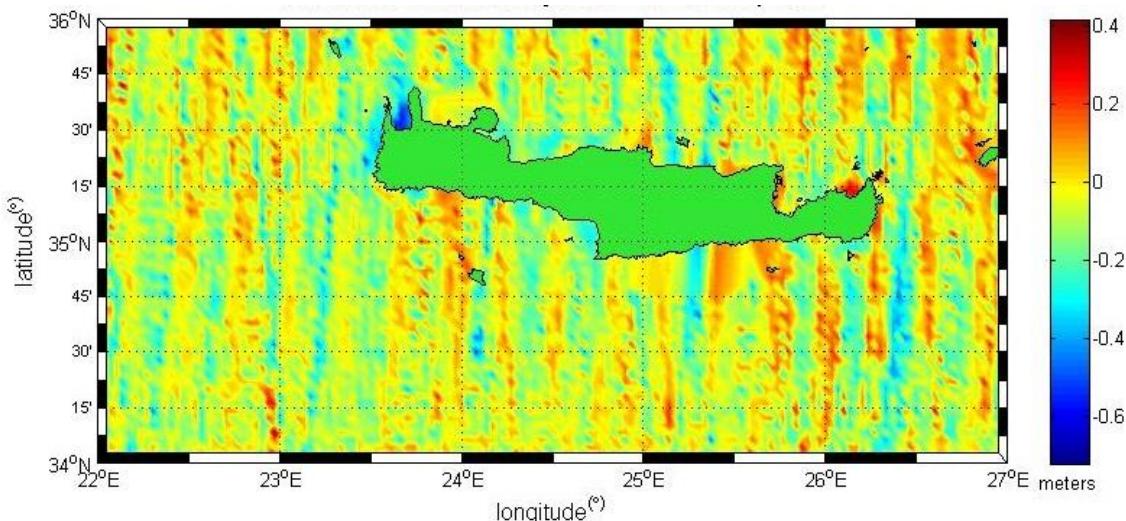
Τιμές στατιστικών χαρακτηριστικών των πρωτογενών SLA (m) της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2				
Mean	Min	Max	RMS	Std
-0.068	-0.809	0.575	0.172	± 0.158

Πίνακας 2.1 Στατιστικά χαρακτηριστικά των πρωτογενών SLA της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2

Παρατηρούμε ότι για τα αρχικά δεδομένα των SLA η μέση τιμής τους βρίσκεται στα -6.8 cm, με την τυπική απόκλιση να είναι ± 15.8 cm. Οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές είναι -80.9 cm και 57.5 cm αντίστοιχα και το μέσο τετραγωνικό στα 17.2 cm.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται όλες οι παρεμβολές που πραγματοποιήθηκαν στο πλέγμα 2arcmin που δημιουργήθηκε. Οι γραφικές αναπαραστάσεις για την περιοχή παρουσιάζουν τις τιμές SLA στη θάλασσα με τα αντίστοιχα στατιστικά τους.

Ακολουθεί η αναπαράσταση της γραμμικής παρεμβολής για την περιοχή μελέτης με τα αντίστοιχα στατιστικά στοιχεία της.



Εικόνα 2.4 Απεικόνιση των SLA για την περιοχή μελέτης μετά τη γραμμική παρεμβολή

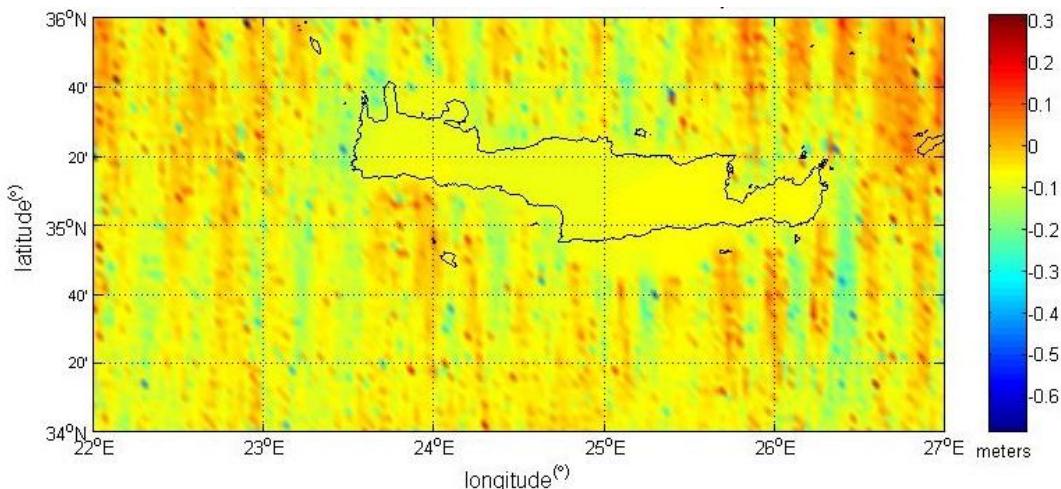
Τιμές στατιστικών χαρακτηριστικών των SLA (m) που προέκυψαν από πρόγνωση με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής				
Mean	Min	Max	RMS	Std
-0.067	-0.721	0.416	0.14	± 0.028

Πίνακας 2.2 Στατιστικά χαρακτηριστικά των SLA που προέκυψαν από πρόγνωση με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής των πρωτογενών δεδομένων της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2

Στην παραπάνω περίπτωση της γραμμικής παρεμβολής παρατηρούμε ότι η μέση τιμή βρίσκεται στα -6.7 cm και η τυπική απόκλιση λαμβάνει την τιμή ± 2.8 cm. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα έχει την τιμή 14 cm την στιγμή που η ελάχιστη και

μέγιστη τιμή βρίσκεται στα -72 cm και 41 cm αντίστοιχα. Στην απεικόνιση 2.4 μπορούμε να παρατηρήσουμε και τα ίχνη των τροχιών της δορυφορικής αποστολής.

Ακολουθεί η περίπτωση της διγραμμικής παρεμβολής, όπως υπολογίσθηκε από το λογισμικό GRAVSOFT με τα αντίστοιχα στατιστικά στοιχεία.



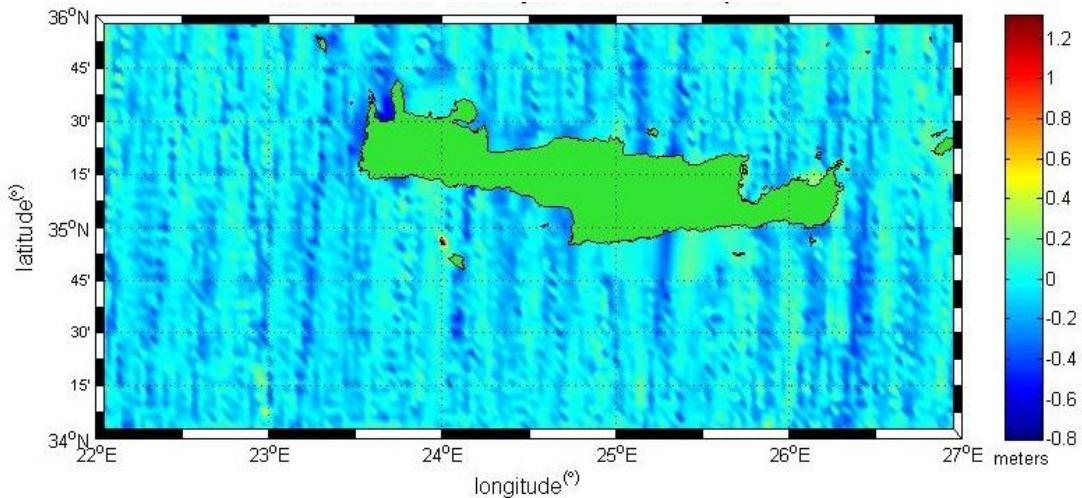
Εικόνα 2.5 Απεικόνιση των SLA για την περιοχή μελέτης μετά τη διγραμμική παρεμβολή

Τιμές στατιστικών χαρακτηριστικών των SLA (m) που προέκυψαν από πρόγνωση με τη μέθοδο της διγραμμικής παρεμβολής				
Mean	Min	Max	RMS	Std
-0.07	-0.69	0.31	0.09	± 0.056

Πίνακας 2.3 Στατιστικά χαρακτηριστικά των SLA που προέκυψαν από πρόγνωση με τη μέθοδο της διγραμμικής παρεμβολής των πρωτογενών δεδομένων της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2

Στην παραπάνω περίπτωση της διγραμμικής παρεμβολής παρατηρούμε ότι η μέση τιμή βρίσκεται στα -7 cm και η τυπική απόκλιση παίρνει την τιμή ± 5.6 cm. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα έχει την τιμή 9 cm την στιγμή που η ελάχιστη και μέγιστη τιμή βρίσκεται στα -69 cm και 31 cm αντίστοιχα. Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρούμε μία αύξηση της τάξεως των 3 cm στην τυπική απόκλιση σε σχέση με την περίπτωση της γραμμικής παρεμβολής, τη στιγμή που το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μειώνεται κατά 5 cm.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κυβική παρεμβολή, όπως υπολογίσθηκε από το λογισμικό MATLAB.



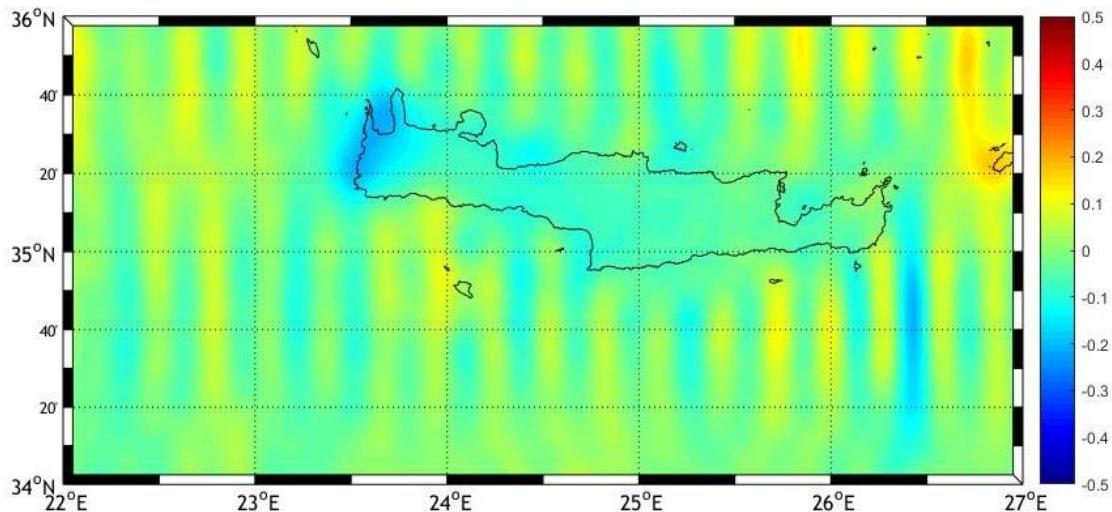
Εικόνα 2.6 Απεικόνιση των SLA για την περιοχή μελέτης μετά την κυβική παρεμβολή

Τιμές στατιστικών χαρακτηριστικών των SLA (m) που προέκυψαν από πρόγνωση με τη μέθοδο της κυβικής παρεμβολής				
Mean	Min	Max	RMS	Std
-0.067	-0.801	1.321	0.155	± 0.032

Πίνακας 2.4 Στατιστικά χαρακτηριστικά των SLA που προέκυψαν από πρόγνωση με τη μέθοδο της κυβικής παρεμβολής των πρωτογενών δεδομένων της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2

Στην περίπτωση της κυβικής παρεμβολής παρατηρούμε ότι η μέση τιμή βρίσκεται στα -6.7 cm και η τυπική απόκλιση παίρνει την τιμή ± 3.2 cm. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα έχει την τιμή 15.5 cm την στιγμή που η ελάχιστη και μέγιστη τιμή βρίσκεται στα -80.1 cm και 1.32 m αντίστοιχα.

Ακολουθεί η περίπτωση της παρεμβολής με τη μέθοδο LSC με τη χρήση του προγράμματος GEOCOL του λογισμικού GRAVSOFT.



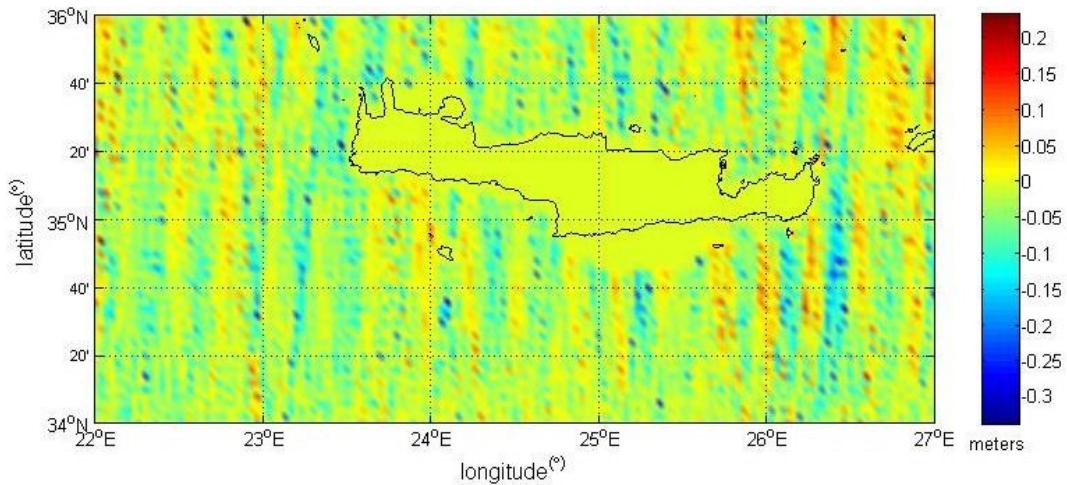
Εικόνα 2.7 Απεικόνιση των SLA για την περιοχή μελέτης μετά την παρεμβολή με τη μέθοδο σημειακής προσαρμογής

Τιμές στατιστικών χαρακτηριστικών των SLA (m) που προέκυψαν από πρόγνωση με τη μέθοδο σημειακής προσαρμογής				
Mean	Min	Max	RMS	Std
-0.014	-0.192	0.161	0.053	± 0.051

Πίνακας 2.5 Στατιστικά χαρακτηριστικά των SLA που προέκυψαν από πρόγνωση με τη μέθοδο σημειακής προσαρμογής των πρωτογενών δεδομένων της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2

Στην παραπάνω περίπτωση της παρεμβολής με LSC παρατηρούμε ότι η μέση τιμή βρίσκεται στα -1.4 cm και η τυπική απόκλιση λαμβάνει την τιμή ± 5.1 cm. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα έχει την τιμή 5.3 cm την στιγμή που η ελάχιστη και μέγιστη τιμή βρίσκεται στα -19.2 cm και 16.1 cm αντίστοιχα. Η περίπτωση αυτή σε σχέση με τις προηγούμενες παρατηρούμε ότι έχει πολύ μικρή μέση τιμή και τυπική απόκλιση, καθώς επίσης και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα δεν παρουσιάζει υψηλή τιμή.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της πρόγνωσης των SLA με τη μέθοδο kriging μέσω του λογισμικού MATLAB.



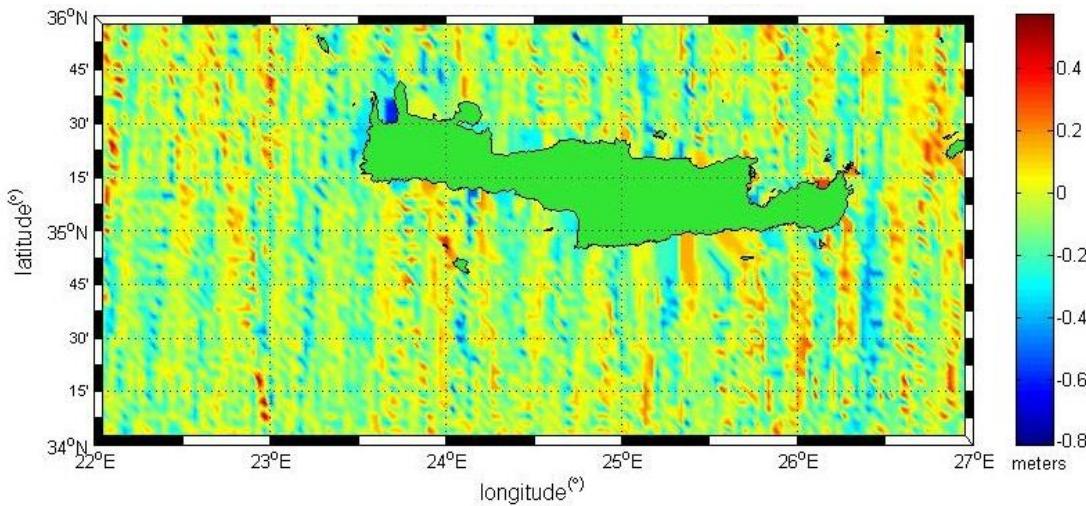
Εικόνα 2.8 Απεικόνιση των SLA για την περιοχή μελέτης μετά την παρεμβολή με τη μέθοδο Kriging

Τιμές στατιστικών χαρακτηριστικών των SLA (m) που προέκυψαν από πρόγνωση με τη μέθοδο Kriging				
Mean	Min	Max	RMS	Std
-0.024	-0.339	0.232	0.052	± 0.047

Πίνακας 2.6 Στατιστικά χαρακτηριστικά των SLA που προέκυψαν από πρόγνωση με τη μέθοδο Kriging των πρωτογενών δεδομένων της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2

Στην περίπτωση της παρεμβολής με τη μέθοδο kriging παρατηρούμε ότι η μέση τιμή βρίσκεται στα -2.4 cm και η τυπική απόκλιση παίρνει την τιμή ± 4.7 cm. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα έχει την τιμή 5.2 cm την στιγμή που η ελάχιστη και μέγιστη τιμή βρίσκεται στα -33.9 cm και 23.2 cm αντίστοιχα. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά της περίπτωσης αυτής προσεγγίζουν την προηγούμενη μέθοδο LSC.

Ακολουθεί η μέθοδος πλησιέστερου σημείου, η οποία υπολογίσθηκε με τη χρήση του λογισμικού MATLAB για την περιοχή μελέτης.



Εικόνα 2.9 Απεικόνιση των SLA για την περιοχή μελέτης μετά την παρεμβολή με τη μέθοδο πλησιέστερου σημείου

Τιμές στατιστικών χαρακτηριστικών των SLA (m) που προέκυψαν από πρόγνωση με τη μέθοδο πλησιέστερου σημείου				
Mean	Min	Max	RMS	Std
-0.07	-0.809	0.575	0.182	± 0.03

Πίνακας 2.7 Στατιστικά χαρακτηριστικά των SLA που προέκυψαν από πρόγνωση με τη μέθοδο πλησιέστερου σημείου των πρωτογενών δεδομένων της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2

Στην περίπτωση της παρεμβολής με τη μέθοδο πλησιέστερου σημείου παρατηρούμε ότι η μέση τιμή βρίσκεται στα -7 cm και η τυπική απόκλιση παίρνει την τιμή ± 3 cm. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα έχει την τιμή 18.2 cm την στιγμή που η ελάχιστη και μέγιστη τιμή βρίσκεται στα -80.9 cm και 57.5 cm αντίστοιχα.

2.3. Γεωδυναμικά Μοντέλα

Το γεωδυναμικό μοντέλο *EGM2008* (Earth Gravitational Model 2008) αποτελεί ένα μοντέλο σφαιρικών αρμονικών του βαρυτικού δυναμικού της Γης, το οποίο αναπτύχθηκε από ένα συνδυασμό ελαχίστων τετραγώνων του μοντέλου βαρύτητας ITG-GRACE03S με ανωμαλίες βαρύτητας ελεύθερου αέρα για τις ηπειρωτικές εκτάσεις από επίγεια δεδομένα και για τις θαλάσσιες εκτάσεις από δορυφορική αλτιμετρία, σε ένα πλέγμα 5arcmin (Pavlis et al. 2008). Οι θαλάσσιες τιμές

βαρύτητας προέκυψαν από τη μετατροπή υψομέτρων της μέσης στάθμης της θάλασσας με τη χρήση του προκαταρκτικού μοντέλου PGM2007B και το αντίστοιχο μοντέλο της Δυναμικής Τοπογραφίας των Ωκεανών (Dynamic Ocean Topography, DOT). Οι προσπάθειες υπολογισμού ξεκίνησαν το 2004 υπό την αιγίδα της NGA και με τη συμβολή πολλών γεωδαιτικών οργανισμών και ερευνητικών ομάδων ανά τον κόσμο για τη συλλογή και επεξεργασία των απαραίτητων στοιχείων. Έτσι, την άνοιξη του 2008 το νέο, υψηλής ανάλυσης μοντέλο βαρύτητας, EGM2008, ήταν διαθέσιμο από την Υπηρεσία Γεωχωρικών Πληροφοριών των Η.Π.Α. (National Geospatial Intelligence Agency-NGA) (Pavlis et al. 2008).

Το *EGM2008*, εκτός των άλλων, περιλαμβάνει δεδομένα βαρύτητας από τους δίδυμους δορυφόρους GRACE, υψηλής ακρίβειας και διάρκειας 57 μηνών (Αύγουστος 2002 - Απρίλιος 2007), όπως αυτά είχαν περιληφθεί στον υπολογισμό του γεωδυναμικού μοντέλου ITG-GRACE03S.

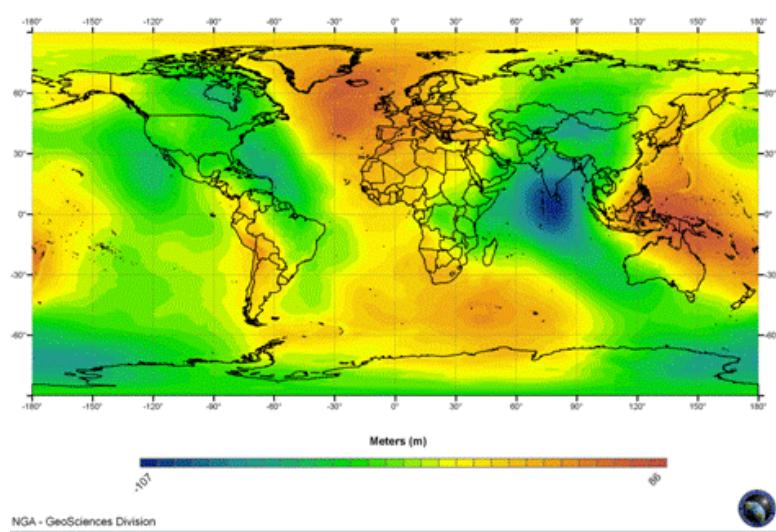
Το ITG-GRACE03S είναι ένα μοντέλο δορυφορικών μόνο δεδομένων (Satellite only model), το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην ανάπτυξη του EGM2008 και υπολογίστηκε στο Ινστιτούτο Θεωρητικής Γεωδαισίας του Πανεπιστημίου της Βόννης στη Γερμανία. Οι χαμηλές τροχιές των συγκεκριμένων δορυφόρων επιτρέπουν την ανίχνευση ακόμα και μικρών αλλαγών της βαρύτητας, με τρόπο ώστε να καθιστούν δυνατή την εκτίμηση των μεγάλου μήκους κύματος χαρακτηριστικών του πεδίου βαρύτητας με περίπου 100 φορές μεγαλύτερη ακρίβεια από ότι ήταν δυνατό για το προηγούμενο μοντέλο EGM96 (Δεληκαράογλου 2010).

Το *EGM2008* είναι πλήρες μέχρι βαθμό και τάξη 2159 και περιέχει επιπλέον συντελεστές μέχρι βαθμό 2190 και τάξη 2159 (Pavlis et al. 2012). Αποτελεί αυτή τη στιγμή την αρτιότερη βάση παγκόσμιων δεδομένων βαρύτητας, με υψηλή ανάλυση και ακρίβεια, παρέχοντας στην επιστημονική κοινότητα χαρακτηριστικά του γεωειδούς με μεγάλη λεπτομέρεια και ανωμαλίες της βαρύτητας με πολύ υψηλές ακρίβειες. Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι το EGM2008 δεν περιλαμβάνει οποιαδήποτε δεδομένα χωροσταθμήσεων με GPS ή δεδομένα αποκλίσεων της κατακορύφου, παρά το γεγονός ότι τέτοιου είδους συγκρίσεις χρησιμοποιήθηκαν

κατά κόρον για την τελική αξιολόγηση του μοντέλου. Πολλές συγκρίσεις και αξιολογήσεις έγιναν για τις παρεχόμενες ακρίβειες, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στην σχετική βιβλιογραφία (Gruber 2009, Pavlis et al. 2012). Στις περιοχές που καλύπτονται με υψηλής ακρίβειας δεδομένα βαρύτητας, οι διαφορές μεταξύ των ανωμαλιών του γεωειδούς από το EGM2008 και των τιμών από GPS/χωροστάθμηση είναι της τάξεως των ± 5 cm έως ± 10 cm (Pavlis et al. 2012).

Σε σύγκριση με το EGM96, από το ανάπτυγμα του οποίου ήταν δυνατόν να προσδιοριστούν υψόμετρα του γεωειδούς με ονομαστική μέση ακρίβεια της τάξης των ± 50 cm και διακριτική ικανότητα 30 arcmin (55 χιλιόμετρα) (Δεληκαράογλου 2010), το EGM2008 μπορεί να υπολογίσει υψόμετρα του γεωειδούς με μέση ακρίβεια της τάξης των ± 15 cm και διακριτική ικανότητα 5 arcmin, που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος περίπου 9 χιλιόμετρα στον ισημερινό – δηλαδή περίπου 3 φορές μεγαλύτερη ακρίβεια και 6 φορές υψηλότερη ανάλυση σε σχέση με το EGM96. Σημαντικό ρόλο στην βελτίωση και την υψηλή ανάλυση που παρέχει το EGM2008 διαδραμάτισε η ύπαρξη υψομετρικών δεδομένων στις ηπειρωτικές περιοχές του πλανήτη από την ειδική αποστολή SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) του διαστημικού οχήματος Endeavour το 2000.

Η ειδική αποστολή SRTM ήταν η πρώτη στην οποία χρησιμοποιήθηκε δορυφορικά η τεχνική της συμβολομετρίας ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (Synthetic Aperture Radar – SAR) απλής διέλευσης (single pass interferometric SAR), που επέτρεψε να καλυφθεί πάνω από το 80% της γήινης επιφάνειας με υψομετρικά δεδομένα υψηλής ακρίβειας καλύτερης από ± 16 cm και χωρική ανάλυση αντίστοιχα 1 και 3 arcsec που αντιστοιχούν σε οριζόντια απόσταση μεταξύ σημείων στο έδαφος περίπου 30 m και 90 m στον ισημερινό (Δεληκαράογλου 2010).

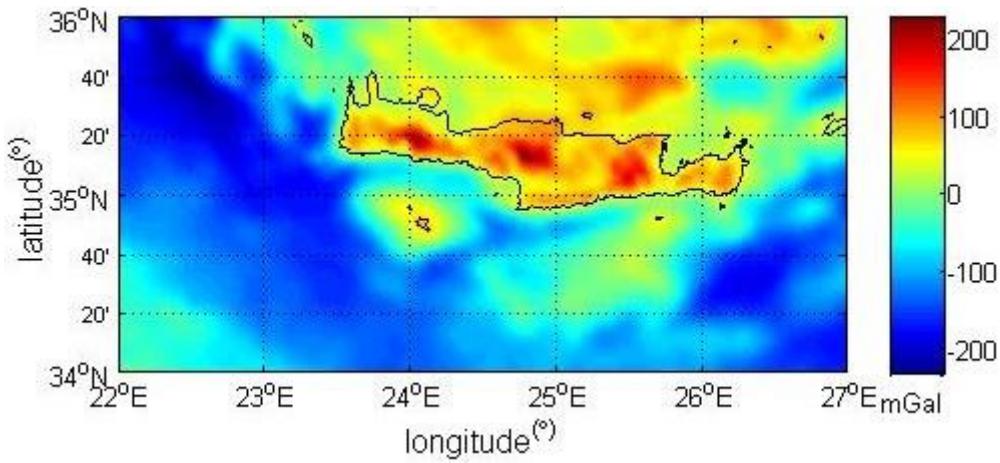


Εικόνα 2.10 Υψόμετρα του γεωειδούς σε παγκόσμια κλίμακα από το EGM 2008 σε πλέγμα 2.5' (<http://earth-info.nga.mil>)

2.4. Μοντέλα βαρύτητας και γεωειδούς από προηγούμενες μελέτες

Σ' αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται δύο μοντέλα, γεωειδούς και βαρύτητας, από προηγούμενες μελέτες για την ευρύτερη περιοχή της Κρήτης (Tziavos et al. 2013, Mertikas et al. 2013). Οι προσπάθειες έγιναν στην ευρύτερη περιοχή της Γαύδου για την εκτίμηση του γεωειδούς με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό του γεωειδούς είναι η τεχνική αφαίρεσης-υπολογισμού-επαναφοράς (remove-compute-restore/RCR), ενώ τα υπόλοιπα (residuals) των υψομέτρων του γεωειδούς υπολογίσθηκαν με τη μέθοδο LSC.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα μοντέλο ανωμαλιών βαρύτητας ελεύθερου αέρα για την ευρύτερη περιοχή της Κρήτης με τα στατιστικά χαρακτηριστικά του.



Εικόνα 2.11 Ανωμαλίες βαρύτητας ελεύθερου αέρα για την περιοχή μελέτης

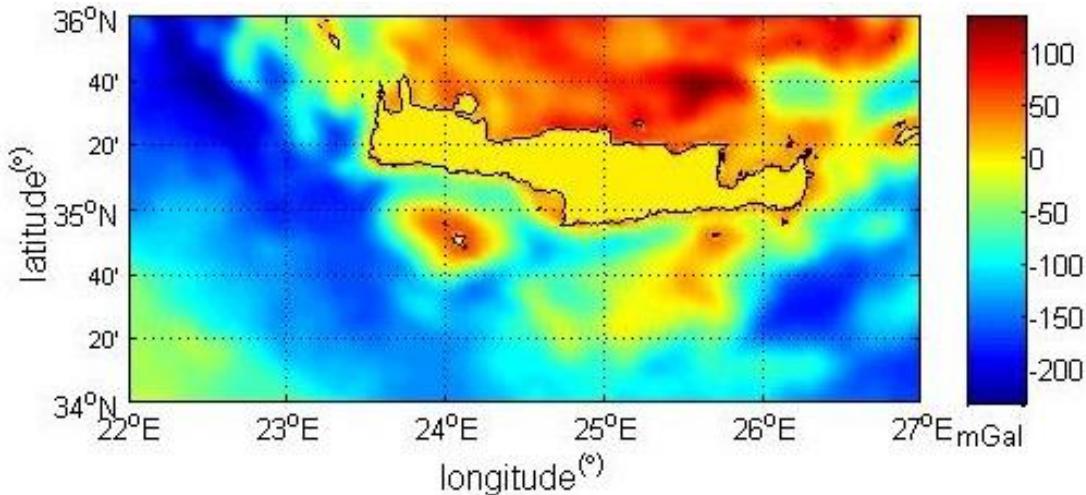
Παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες τιμές των ανωμαλιών βαρύτητας υπάρχουν στην ηπειρωτική περιοχή που φτάνουν μέχρι και τα 228 mGal.

Τιμές στατιστικών χαρακτηριστικών (mGal) των ανωμαλιών βαρύτητας ελεύθερου αέρα				
Mean	Min	Max	RMS	Std
-55.724	-233.137	227.871	103.957	87.765

Πίνακας 2.8 Στατιστικά χαρακτηριστικά ανωμαλιών βαρύτητας ελεύθερου αέρα για την περιοχή μελέτης

Η μέση τιμή των ανωμαλιών φτάνει τα -55.7 mGal, ενώ η τυπική απόκλιση και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι 87.7 mGal και 103.957 mGal αντίστοιχα. Η ελάχιστη τιμή παρατηρείται στο θαλάσσιο χώρο της περιοχής στα -233.1 mGal.

Ακολουθεί η απεικόνιση των ανωμαλιών βαρύτητας χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι τιμές της ηπειρωτικής περιοχής. Τα δεδομένα της στεριάς αφαιρέθηκαν με τη χρήση της βιβλιοθήκης GMT (Wessel et al. 1998). Παρατηρείται μία μείωση της τυπικής απόκλισης των δεδομένων, ενώ επίσης η μέγιστη τιμή τους μειώθηκε αισθητά.



Εικόνα 2.12 Ανωμαλίες βαρύτητας ελεύθερου αέρα μόνο για τη θαλάσσια περιοχή μελέτης

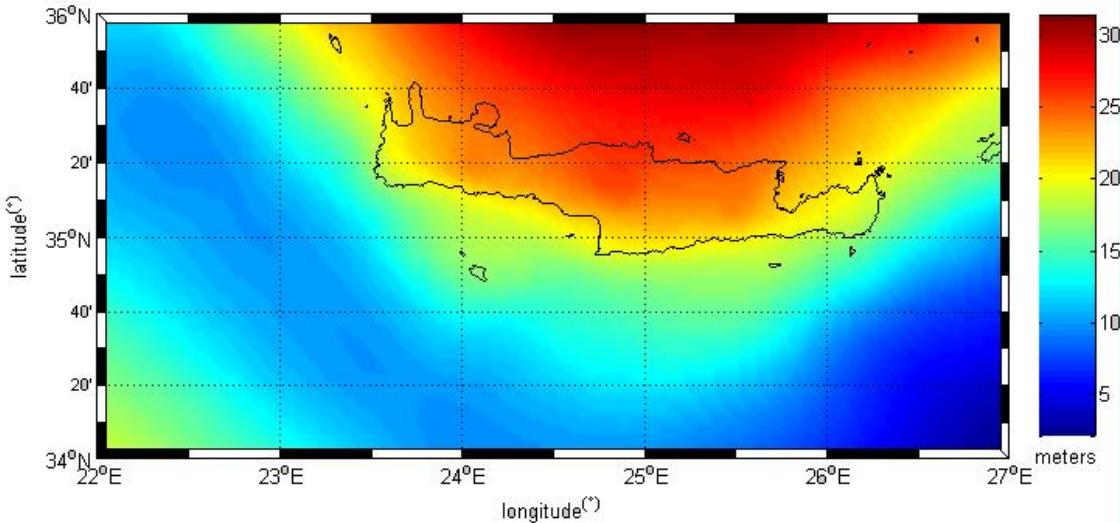
Τιμές στατιστικών χαρακτηριστικών (mGal) των ανωμαλιών βαρύτητας ελεύθερου αέρα
μόνο για τη θαλάσσια περιοχή μελέτης

Mean	Min	Max	RMS	Std
-68.094	-233.137	140.010	105.795	80.972

Πίνακας 2.9 Στατιστικά χαρακτηριστικά ανωμαλιών βαρύτητας ελεύθερου αέρα μόνο για τη θαλάσσια περιοχή μελέτης

Στην παραπάνω περίπτωση τα δεδομένα της ηπειρωτικής χώρας έχουν αφαιρεθεί με τη χρήση της GMT. Η μέση τιμή κυμαίνεται στα -68.1 mGal με την τυπική απόκλιση να παρουσιάζει μία μικρή μείωση σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση και να είναι στα 80.9 mGal. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι 105.795 mGal και η μέγιστη τιμή των δεδομένων από τα 228 mGal μειώνεται στα 105.8 mGal.

Ακολούθως, παρουσιάζεται το μοντέλο γεωειδούς για την περιοχή της Κρήτης όπως προέκυψε από τη μέθοδο RCR και τα αντίστοιχα στατιστικά χαρακτηριστικά του.



Εικόνα 2.13 Μοντέλο γεωειδούς για την περιοχή της Κρήτης

Τιμές στατιστικών χαρακτηριστικών (m) του μοντέλου γεωειδούς της Κρήτης				
Mean	Min	Max	RMS	Std
16.024	2.145	31.234	17.417	2.060

Πίνακας 2.10 Στατιστικά χαρακτηριστικά του μοντέλου γεωειδούς για την περιοχή της Κρήτης

Για το μοντέλο γεωειδούς στην ευρύτερη περιοχή της Κρήτης παρατηρούμε ότι η μέση τιμή βρίσκεται στα 16.024 m με την τυπική απόκλιση στα 2.06 m και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα στα 17.417 m. Η ελάχιστη τιμή των δεδομένων είναι στα 2.145 m και η μέγιστη τιμή στην βόρεια περιοχή στα 31.234 m.

2.5. Μοντέλα δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας

Μία βασική έννοια που συνεισφέρει στον υπολογισμό του θαλάσσιου γεωειδούς και δεν υπερβαίνει τα 2m σε παγκόσμια κλίμα είναι η Δυναμική Θαλάσσια Τοπογραφία (MDT). Ο υπολογισμός της μπορεί να προκύψει από τη χρήση μοντέλων τα οποία προσφέρουν ικανοποιητική ακρίβεια.

Στην περιοχή της Μεσογείου της τελευταίες δεκαετίες με τη χρήση αλτιμετρικών δεδομένων των δορυφόρων TOPEX/POSEIDON, ERS-1 και ERS-2 κατέστη δυνατή η περαιτέρω κατανόηση και μοντελοποίηση των μεταβολών της στάθμης της

θάλασσας.

Η έλλειψη μοντέλων υψηλής ακρίβειας της Δυναμικής Θαλάσσιας Τοπογραφίας για την περιοχή της Μεσογείου οδήγησε στην ανάγκη δημιουργίας ενός όσο το δυνατόν ακριβούς μοντέλου. Ένα τέτοιο είναι το μοντέλο που υπολογίστηκε από τους Rio et al. (2007). Τα δεδομένα προήλθαν από συνδυασμό των αλτιμετρικών δεδομένων των δορυφόρων T/P, ERS-1, ERS-2 και μετρήσεων ταχύτητας κινούμενων πλωτήρων (drifting buoys) δορυφορικού εντοπισμού (satellite – tracked), στην επιφάνεια της θάλασσας, σε περιοχές της Μεσογείου.

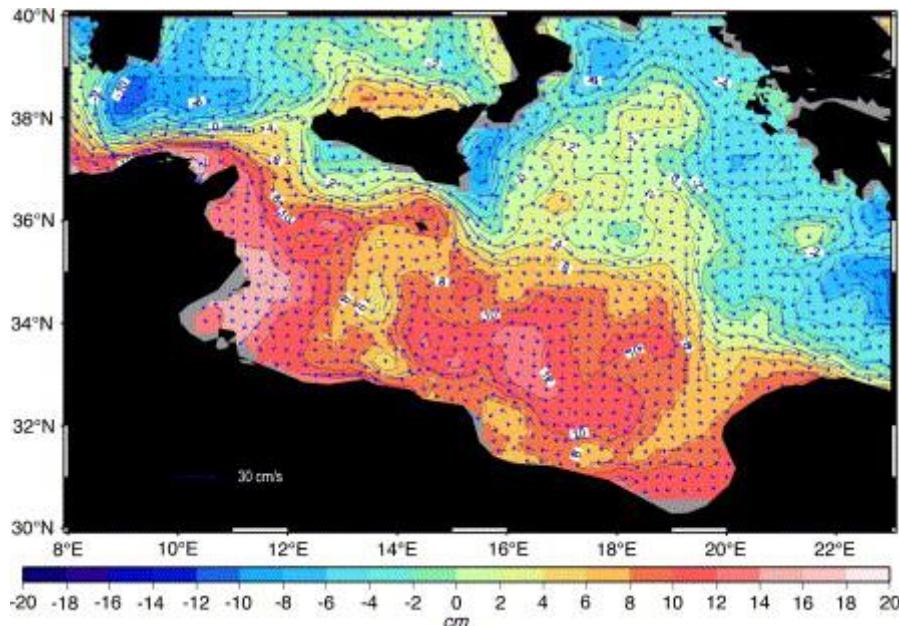
Τα δεδομένα των κινούμενων πλωτήρων που χρησιμοποιήθηκαν στη Μεσόγειο καλύπτουν την περίοδο από 1 Ιανουαρίου 1993 μέχρι 11 Νοεμβρίου 1999. Τα διάφορα δεδομένα αντιστοιχούσαν κατά κύριο λόγο σε μετρήσεις που έγιναν σε βάθος έως 1 μέτρο από την επιφάνεια της θάλασσας και κατόπιν από τα πρωτογενή αυτά δεδομένα αφαιρέθηκαν οι τιμές που παρουσίαζαν μεγάλα σφάλματα. Κατόπιν, έγινε πρόγνωση των δεδομένων αυτών σε ομοιόμορφα κατανεμημένες χρονικές στιγμές με τη χρήση της μεθόδου kriging (Rio et al. 2007), φίλτρων χαμηλής διέλευσης και μετρήσεων σε διαστήματα 6 ωρών. Η βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε περιελάμβανε πάνω από 120,000 μετρήσεις ταχύτητας των οποίων η χωρική κατανομή έγινε σε πλέγμα. Οι περιοχές με τις καλύτερες μετρήσεις είναι η Αδριατική θάλασσα και το Ιόνιο Πέλαγος. Αντίθετα, δεν υπάρχουν δεδομένα για το Αιγαίο Πέλαγος και διάφορες άλλες περιοχές (Ligurian Sea, Northern Levantine basin). Τα σφάλματα στην επεξεργασία των ταχυτήτων των πλωτήρων δε ξεπερνούν τα 2-3 cm/s (Rio et al. 2007).

Τα δεδομένα της δορυφορικής αλτιμετρίας που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του μοντέλου MDT είναι υψόμετρα της στάθμης της θάλασσας (SSH), τα οποία έχουν υποστεί τις συνήθεις αλτιμετρικές διορθώσεις ώστε να έχουν ακρίβεια της τάξεως των. Έπειτα, με την κατάλληλη επεξεργασία των SSH, στο CLS (Collecte Localisation Satellites) στην Τουλούζη της Γαλλίας, υπολογίσθηκαν τιμές SLA που αντιστοιχούν σε ένα μέσο προφίλ επτά ετών (1993 – 1999). Τα δεδομένα από τους δορυφόρους TOPEX/POSEIDON, ERS-1 και ERS-2 αναφέρονται στη χρονική περίοδο

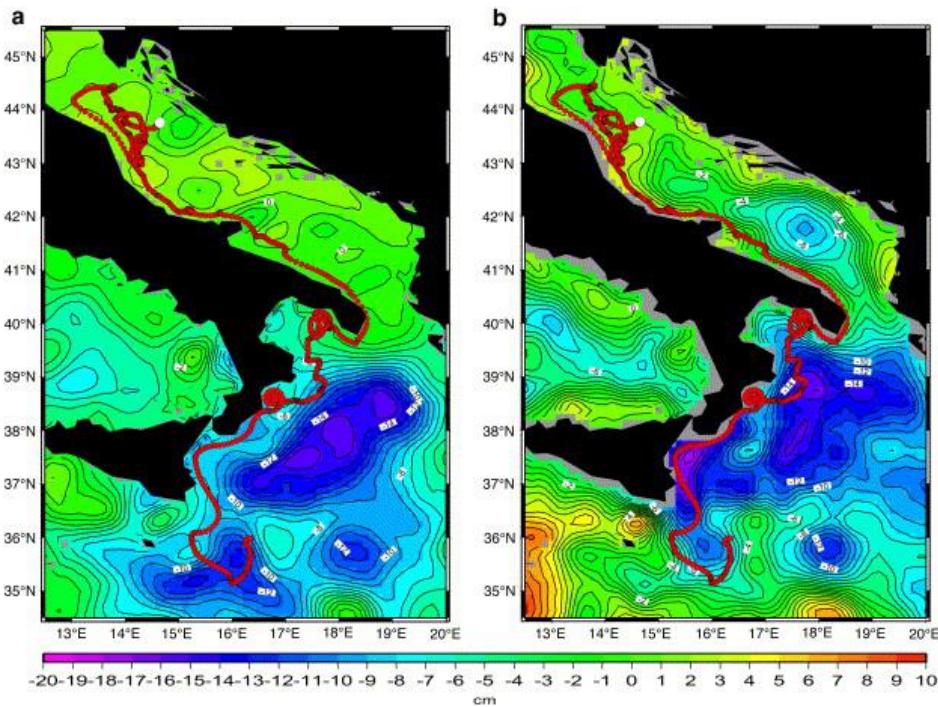
από 1 Ιανουαρίου 1993 έως 1 Οκτωβρίου 2002 και από τους JASON-1, ERS-2 και GEOSAT FOLLOW-ON (GFO) στην περίοδο από 1 Οκτωβρίου 2002 μέχρι 30 Ιουνίου 2003.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της MDT συνοψίζεται σε δύο βήματα (Rio et al. 2007):

1. Συνδυασμός των δεδομένων ταχύτητας από τους κινούμενους πλωτήρες και των SLA με τη βοήθεια της συνθετικής μεθόδου (Rio and Hernandez 2004) ώστε να υπολογισθεί αρχικά ένα σετ εκτιμήσεων της απαιτούμενης MDT
2. Χαρτογράφηση της Δυναμικής Θαλάσσιας Τοπογραφίας κάθε σημείου του πλέγματος



Εικόνα 2.14 Η Μέση Συνθετική Δυναμική Θαλάσσια Τοπογραφία στην περιοχή του Ιονίου. Με μπλε βέλη παριστάνονται τα αντίστοιχα μέσα ρεύματα (Rio et al. 2007)



Εικόνα 2.15 Υπολογίζεται η απόλυτη αλτιμετρική μέση στάθμη από (α) ένα μηδενικό πεδίο και (β) από τη SMDT χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της περιόδου Δεκεμβρίου 2002 – Ιουνίου 2003. Με κόκκινη διαγράμμιση απεικονίζεται η τροχιά του πλωτήρα (Rio et al. 2007)

3. Μαθηματικά Μοντέλα – Μέθοδοι

3.1. Σημειακή Προσαρμογή

Μεταξύ των μεθόδων προσδιορισμού του γεωειδούς σημαντική θέση κατέχει η μέθοδος της σημειακής προσαρμογής (LSC) (Mikhail 1976, Tscherning 1976, Tscherning 1994, Wenzel 1982).

Η σημειακή προσαρμογή χρησιμοποιείται ευρέως στις γεωεπιστήμες σε πολλές εφαρμογές σχετικές με το πεδίο βαρύτητας της Γης, τη βαρυτημετρία και τη γεωδαισία γενικότερα. Είναι μία στοχαστική μέθοδος προσέγγισης του πεδίου βαρύτητας και των παράγωγων μεγεθών του.

Βασική παράμετρος της σημειακής προσαρμογής είναι η συνάρτηση συμμεταβλητότητας του διαταρακτικού δυναμικού, που περιγράφει τα στατιστικά χαρακτηριστικά του γήινου πεδίου βαρύτητας και όλων των χαρακτηριστικών που σχετίζονται μ' αυτό (ανωμαλίες βαρύτητας, υψόμετρα γεωειδούς κ.τ.λ.).

Η σημειακή προσαρμογή στηρίζεται στην ύπαρξη διακριτών και όχι συνοριακών τιμών (Τζιαβός 1984). Στη μέθοδο αυτή δεν προσδιορίζεται το διαταρακτικό δυναμικό αλλά διακριτές τιμές μεγεθών που σχετίζονται με αυτό.

Το πρώτο βήμα ισοδυναμεί με μία γενικευμένη παρεμβολή, όπου επιλέγεται ένα διαταρακτικό δυναμικό ως βέλτιστο με βάση κάποιο κριτήριο, ανάμεσα σε όλες τις σχετικές συναρτήσεις που ικανοποιούν τα συγκεκριμένα διακριτά δεδομένα. Συνεπώς, με τη χρήση της σημειακής προσαρμογής προχωρούμε σε μία λύση προβλήματος συνοριακών τιμών με το μειονέκτημα ότι εξαιτίας των περιορισμένων δεδομένων γίνεται δυσκολότερη η επιλογή του δυναμικού μέσα από τις άπειρες δυνατές λύσεις.

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου της σημειακής προσαρμογής έναντι των άλλων μεθόδων είναι η δυνατότητα χρησιμοποίησης ετερογενών δεδομένων. Η χρήση ετερογενών δεδομένων σε έναν κοινό αλγόριθμο βοηθά στη βελτίωση της

ακρίβειας της λύσης. Σε αντίθεση με τις στοχαστικές μεθόδους όπου η συνεχής πληροφορία επάνω σε ολόκληρο το σύνορο επιτρέπει το μονοσήμαντο προσδιορισμό του διαταρακτικού δυναμικού, στη σημειακή προσαρμογή μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεδομένα τα οποία δεν αναφέρονται στο σύνορο της επιφάνειας προσδιορισμού.

Τα πλεονεκτήματα της σημειακής προσαρμογής συνοψίζονται παρακάτω (Αραμπέλος και Τζιαβός 2007, Βέργος 2006):

- Το αποτέλεσμα είναι ανεξάρτητο του αριθμού των σημείων στα οποία πρόκειται να γίνει πρόγνωση.
- Τόσο οι παρατηρήσεις όσο και τα σήματα που προσδιορίζονται μπορεί να είναι ετερογενή.
- Η λύση που προκύπτει με βάση τα χρησιμοποιούμενα δεδομένα είναι ακριβέστερη σε σύγκριση με οποιασδήποτε άλλης μορφής γραμμική προσέγγιση.

Στον αντίποδα, σημαντικό μειονέκτημα της σημειακής προσαρμογής είναι ο υπολογιστικός φόρτος που απαιτείται για την αντιστροφή ενός πίνακα με γραμμές και στήλες όσες και ο αριθμός των δεδομένων. Μια ταχύτερη παραλλαγή της μεθόδου είναι η ταχεία σημειακή προσαρμογή (fast collocation), η οποία βασίζεται στον υπολογισμό των δεδομένων σε πλέγμα.

Η μέθοδος της σημειακής προσαρμογής μπορεί να διαχωρισθεί σε τρεις κατηγορίες (Κατσάμπαλος και Τζιαβός 1991):

- Σημειακή προσαρμογή χωρίς σφάλματα (Exact collocation).
- Σημειακή προσαρμογή με σφάλματα (Smoothing collocation).
- Σημειακή προσαρμογή με παραμέτρους που σχετίζονται με τις μετρήσεις (Parametric least squares collocation).

Το πρόβλημα της σημειακής προσαρμογής χωρίς σφάλματα διατυπώνεται ως εξής (Τζιαβός 1984, Κατσάμπαλος και Τζιαβός 1991):

Από ένα σύνολο μετρήσεων (παρατηρήσεων) $s_i, i = 1, 2, \dots, r$, οι οποίες σχετίζονται με το διαταρακτικό δυναμικό T της Γης και οι οποίες μπορεί να εκφραστούν ως τιμές ορισμένων γραμμικών συνεχών συναρτησιακών του διαταρακτικού δυναμικού σύμφωνα με τη σχέση

$$s_i = L_i T \quad (3.1)$$

ζητείται να βρεθεί μια προσέγγιση για το T , η οποία ικανοποιεί τις μετρήσεις s_i και τη συνθήκη

$$\| T \| = \min \quad (3.2)$$

Από στοχαστικής πλευράς το T είναι στοχαστική συνάρτηση και τα s_i τιμές τυχαίων μεταβλητών. Η ποσότητα $\| T \|$ ονομάζεται νόρμα του διαταρακτικού δυναμικού. Η ελαχιστοποίηση αυτή πραγματοποιείται μέσω της επιλεγμένης συνάρτησης συμμεταβλητότητας. Το βέλτιστο διαταρακτικό δυναμικό \hat{T} παρουσιάζει την ελάχιστη μεταβλητότητα σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη τιμή του διαταρακτικού δυναμικού. Η ιδιότητα αυτή συνεπάγεται τη χρησιμοποίηση των γνωστών σχέσεων πρόγνωσης με ελάχιστη μεταβλητότητα και είναι γνωστή στη βιβλιογραφία και ως πρόγνωση με ελάχιστα τετράγωνα (least squares prediction). Η προσέγγιση \hat{T} σε ένα σημείο P από η δεδομένες διακριτές τιμές δίνεται από τη σχέση (Αραμπέλος και Τζιαβός 2007)

$$\hat{T} = C_{Pi} C_{ij}^{-1} T \quad (3.3)$$

Για τον υπολογισμό των μεταβλητοτήτων υποθέτουμε ότι οι μετρήσεις T_i έχουν προσδοκία μηδέν, δηλαδή

$$M\{T_i\} = 0 \quad (3.4)$$

Μία από τις συνήθεις περιπτώσεις είναι αυτή της πρόγνωσης υψομέτρων N του γεωειδούς από τιμές βαρύτητας Δg . Το διάνυσμα N των προς πρόγνωση σημάτων είναι

$$\widehat{N} = [\widehat{N}_1 \widehat{N}_2 \cdots \widehat{N}_k]^T \quad (3.5)$$

και το διάνυσμα ανωμαλιών βαρύτητας (παρατηρήσεων)

$$\widehat{\Delta g} = [\Delta g_1 \Delta g_2 \cdots \Delta g_n]^T. \quad (3.6)$$

Η σχέση (4.3) έχει την ακόλουθη μορφή

$$\widehat{N}_k = C_{N\Delta g} C_{\Delta g \Delta g}^{-1} \Delta g \quad (3.7)$$

Τα στοιχεία του πίνακα $C_{N\Delta g}$ υπολογίζονται με το νόμο μετάδοσης των συμμεταβλητών (Κατσάμπαλος και Τζιαβός 1991, Ρωσσικόπουλος 2001) με βάση τη συνάρτηση συμμεταβλητήτας που υπολογίζεται από τα δεδομένα Δg . Τα στοιχεία του πίνακα $C_{\Delta g \Delta g}$ υπολογίζονται από την αναλυτική συνάρτηση συμμεταβλητήτας αυτών των παρατηρήσεων. Για τα στοιχεία του πίνακα αυτού ισχύει

$$C(\Delta g_i, \Delta g_j) = C(\Delta g_j, \Delta g_i) \quad (3.8)$$

Η ακρίβεια της μεθόδου της σημειακής προσαρμογής χωρίς σφάλματα εκφράζεται μέσω του πίνακα συμμεταβλητών E_{NN} των σφαλμάτων ως εξής

$$E_{NN} = C_{\Delta g \Delta g} - C_{N\Delta g} C_{\Delta g \Delta g}^{-1} C_{\Delta g N} \quad (3.9)$$

Τα διαγώνια στοιχεία του παραπάνω πίνακα δίνουν τις μεταβλητότητες των σφαλμάτων πρόγνωσης \widehat{N}_k (Αραμπέλος και Τζιαβός 2007).

Ένα σημείο στο οποίο θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία είναι το σύστημα αναφοράς στο οποίο ανήκουν τα δεδομένα. Στην περίπτωση κατά την οποία τα

ετερογενή δεδομένα ανήκουν σε διαφορετικό σύστημα αναφοράς, μπορούμε να χρησιμοποιούμε τη μέθοδο της σημειακής προσαρμογής με παραμέτρους, η οποία μας δίνει τη δυνατότητα μοντελοποίησης των ασυμφωνιών μεταξύ των συστημάτων αναφοράς (Γρηγοριάδης 2009).

Στο πρόβλημα της σημειακής προσαρμογής με σφάλματα κάθε μέτρηση I αναλύεται σε μία ποσότητα t που ονομάζεται *σήμα* και είναι μία τυχαία ποσότητα και σε μία άλλη ποσότητα e που ονομάζεται *θόρυβος* (noise). Η έννοια θόρυβος έχει την ίδια σημασία με την έννοια *τυχαίο σφάλμα μέτρησης* (random measuring error). Το σφάλμα αυτό είναι μία στοχαστική ποσότητα. Για ένα σύνολο μετρήσεων $(l_i, i = 1, 2, \dots, r)$ ισχύει η σχέση

$$l_i = t_i + e_i \quad (3.10)$$

Για τις μετρήσεις που έγιναν θα ακολουθήσει πρόγνωση ομοειδών ή ετερογενών σημάτων σε ένα ή περισσότερα σημεία ορισμένα εκ των οποίων μπορεί να συμπίπτουν με τα σημεία των παρατηρήσεων. Στα σημεία πρόγνωσης η ποσότητα που εκτιμάται είναι η \hat{s} και δε συμπίπτει με το αληθές σήμα s . Συνεπώς, υπάρχει ένα σφάλμα πρόγνωσης ε , το οποίο δίνεται από τη σχέση (Αραμπέλος και Τζιαβός 2007)

$$\varepsilon = s - \hat{s} \quad (3.11)$$

Αν θεωρήσουμε τις μεταβλητότητες στην (3.10) προκύπτει

$$C_{ll} = C_{tt} + C_{te} + C_{et} + C_{ee}$$

Η οποία αν λάβουμε υπόψη ότι τα σήματα και οι παρατηρήσεις είναι μεγέθη ασυσχέτιστα μεταξύ τους, δηλαδή ο αντίστοιχος πίνακας είναι ο μηδενικός, προκύπτει ότι

$$C_{ll} = C_{tt} + C_{ee} \quad (3.12)$$

Ακόμα, επειδή οι ποσότητες s και e είναι ασυσχέτιστες, είναι $C_{sl} = C_{st}$. Άρα η σχέση (3.3) γίνεται

$$\hat{s} = C_{sl} C_{ll}^{-1} l \quad (3.13)$$

Η ακρίβεια της πρόγνωσης των σημάτων εκτιμάται μέσω της συνάρτησης συμμεταβλητότητας C_{ee} των σφαλμάτων πρόγνωσης e . Η συνάρτηση συμμεταβλητότητας των σφαλμάτων πρόγνωσης E_{ss} δίνεται από τη σχέση :

$$E_{ss} = C_{ss} - C_{st} C_{ll}^{-1} C_{ts} \quad (3.14)$$

όπου τα διαγώνια στοιχεία του δίνουν τις ακρίβειες των σημάτων \hat{s} .

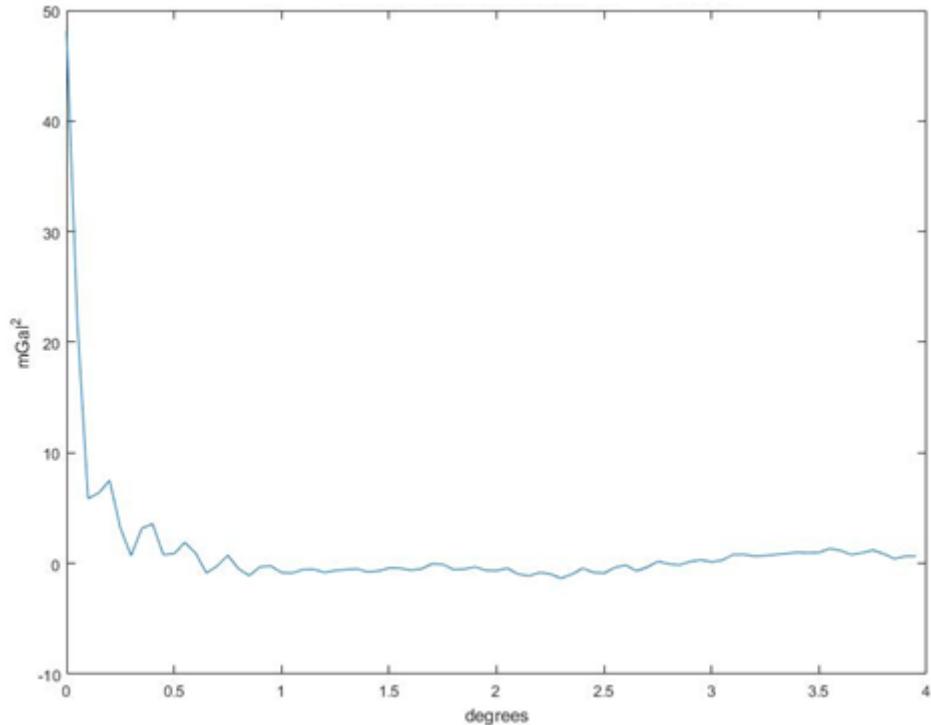
Εμπειρική και αναλυτική συνάρτηση συμμεταβλητότητας στη μέθοδο της σημειακής προσαρμογής (LSC)

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την πρόγνωση των SLA στο πλέγμα της περιοχής μας με τη μέθοδο LSC, καθώς επίσης και της πρόβλεψης των ανωμαλιών βαρύτητας από τα SLA στο πλέγμα πρόγνωσης για τη δημιουργία των μοντέλων βαρύτητας που παρουσιάζονται στο 4^ο Κεφάλαιο.

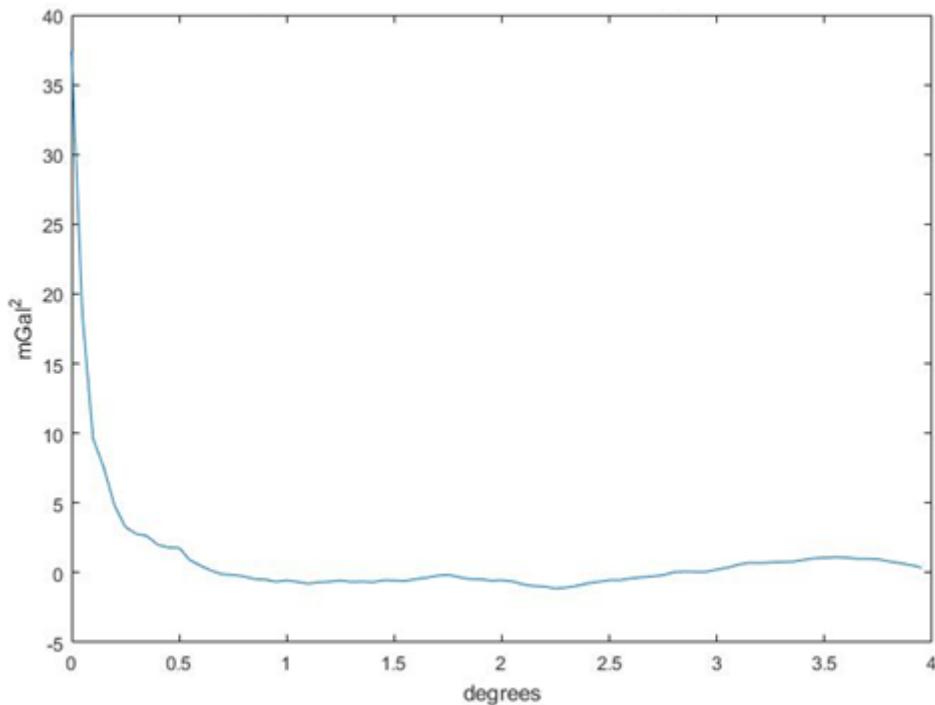
Στο πρώτο βήμα γίνεται ο υπολογισμός της εμπειρικής συνάρτησης συμμεταβλητότητας (empirical covariance function) των υπολοίπων της βαρύτητας (μετά την αφαίρεση της συνεισφοράς του EGM2008) από τη βάση βαρύτητας της Κρήτης για την περιοχή μελέτης (Tziavos et al. 2013). Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για το λόγο αυτό είναι το GRAVSOFT και το πρόγραμμα EMPCOV. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογισθεί η εμπειρική συνάρτηση είναι 9,211 και αναφέρονται σε όλο το πλέγμα που υπολογίσθηκε για την περιοχή μελέτης.

Για τον υπολογισμό της εμπειρικής συνάρτησης συμμεταβλητότητας οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι ο αριθμός των δεδομένων, το βήμα (διάστημα,

κλάση) (sampling interval) της συνάρτησης συμμεταβλητότητας σε arcmin και ο αριθμός των βημάτων. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το βήμα (arcmin) και τον αριθμό των βημάτων (διαστημάτων) είναι αντίστοιχα: 3 και 80.



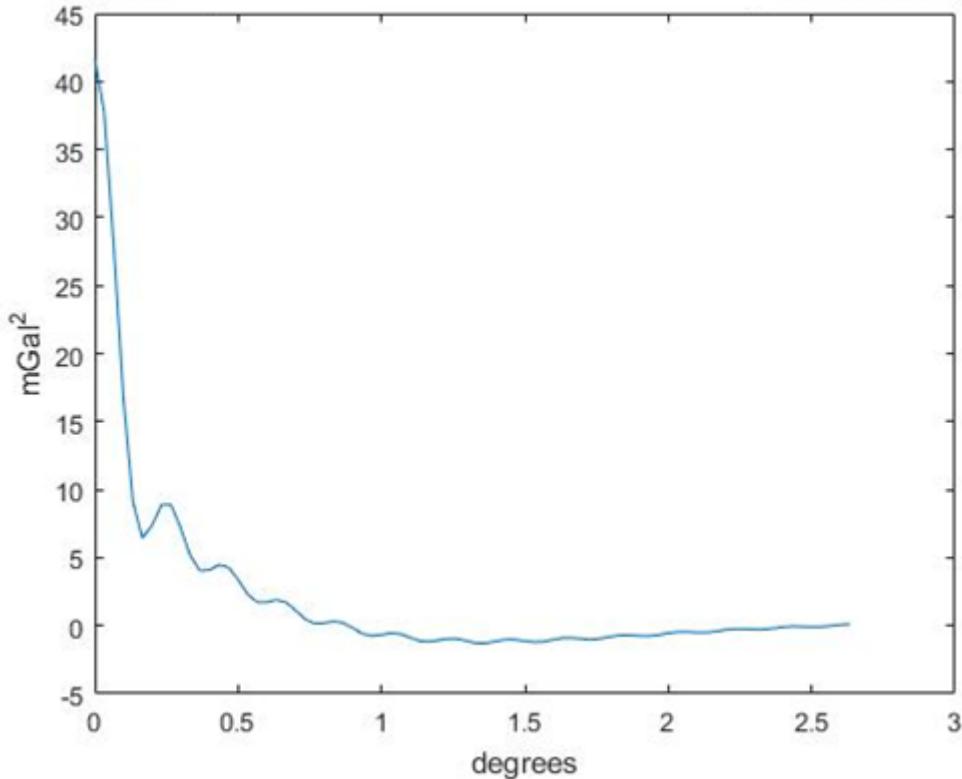
Εικόνα 3.1 Εμπειρική συνάρτηση συμμεταβλητότητας των υπολοίπων των ανωμαλιών βαρύτητας για βαθμό 1834



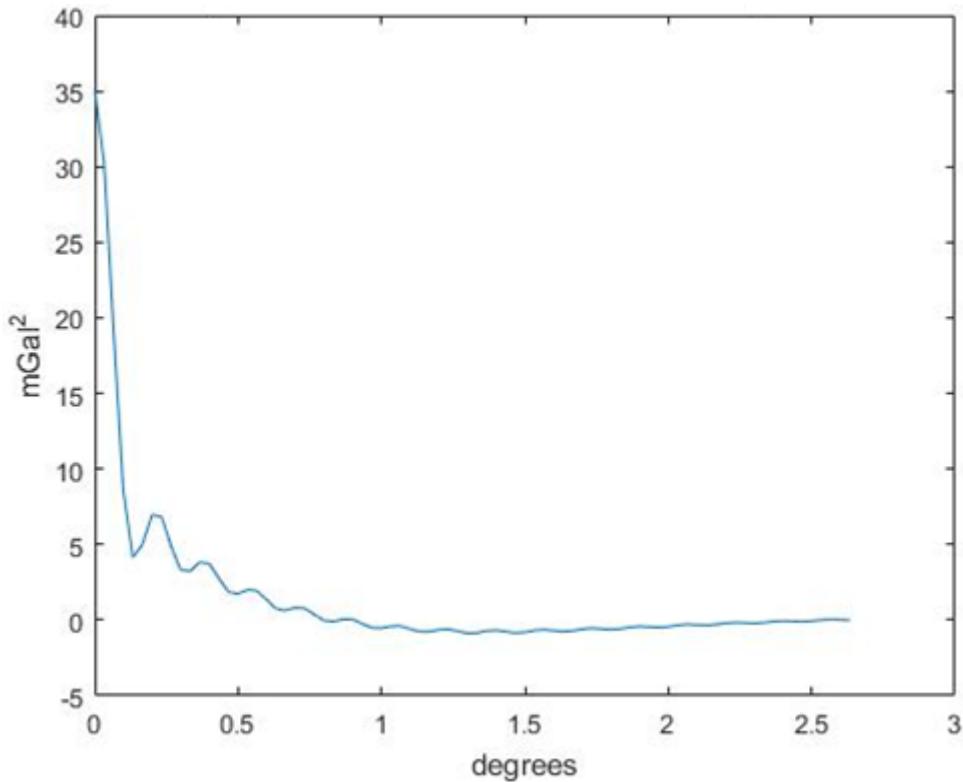
Εικόνα 3.2 Εμπειρική συνάρτηση συμμεταβλητότητας των υπολοίπων των ανωμαλιών βαρύτητας για βαθμό 2160

Στο επόμενο βήμα και αφού υπολογίσθηκαν οι εμπειρικές συναρτήσεις συμμεταβλητότητας για τις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις, με τη χρήση του προγράμματος COVFIT υπολογίζονται οι αναλυτικές συναρτήσεις συμμεταβλητότητας. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται προσαρμόζοντας τις εμπειρικές συναρτήσεις στο μοντέλο Tscherning και Rapp (Tscherning 1993, Tscherning 1994, Tscherning 1976). Στα δεδομένα εισόδου του COVFIT, το οποίο εκτελείται δύο φορές, δίνονται κατά προσέγγιση για την περιοχή μελέτης το βάθος της σφαίρας του Bjerhammar, η μεταβλητότητα των δεδομένων βαρύτητας και ένας συντελεστής κλίμακας για τους συντελεστές μεταβλητότητας σφάλματος (error degree variances). Η εφαρμογή του αλγορίθμου δίνει τις συνορθωμένες τιμές για τα παραπάνω μεγέθη, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν αφενός μεν για τον υπολογισμό του αναλυτικού μοντέλου συμμεταβλητοτήτων και αφ' ετέρου για το λογισμικό GEOCOL στη συνέχεια για τον υπολογισμό των SLA και των υψομέτρων του γεωειδούς. Για τον υπολογισμό της αναλυτικής συνάρτησης συμμεταβλητότητας των δεδομένων απαιτείται η εισαγωγή στο πρόγραμμα COVFIT των σφαλμάτων των συντελεστών μεταβλητότητας των ανωμαλιών βαρύτητας.

Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις των αναλυτικών συναρτήσεων συμμεταβλητότητας των ανωμαλιών βαρύτητας των ανηγμένων στο EGM2008 για βαθμούς 1834 και 2160.



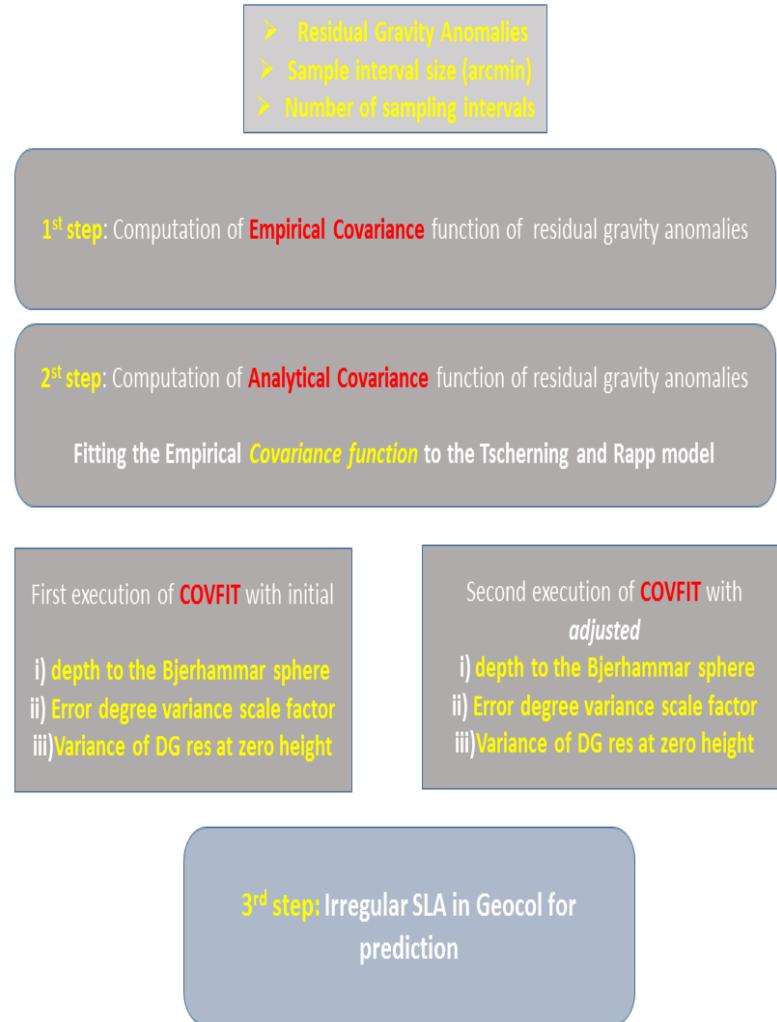
Εικόνα 3.3 Αναλυτική συνάρτηση συμμεταβλητότητας των υπολοίπων βαρύτητας για βαθμό 1834



Εικόνα 3.4 Αναλυτική συνάρτηση συμμεταβλητότητας των υπολοίπων βαρύτητας για βαθμό 2160

Το τρίτο βήμα περιλαμβάνει τη χρήση του προγράμματος GEOCOL για την i) πρόγνωση των SLA επάνω στο πλέγμα της περιοχής με τη μέθοδο LSC και ii) την πρόγνωση των ανωμαλιών βαρύτητας επάνω στο ίδιο πλέγμα.

Παρακάτω παρουσιάζεται η πορεία των βημάτων για την πρόγνωση με LSC μέσω του GEOCOL. Οι διάφοροι όροι αναφέρονται στα αγγλικά για την ευκολότερη διαχείριση των προγραμμάτων από οποιονδήποτε ενδιαφέρεται για επιτλέον αριθμητικές εφαρμογές.



Εικόνα 3.5 Διάγραμμα ροής για την δημιουργία εμπειρικών και αναλυτικών συναρτήσεων συμμεταβλητήτας και πρόγνωση με ελάχιστα τετράγωνα

3.2. Φασματικές Μέθοδοι – FFT

Ο μετασχηματισμός Fourier είναι μια επέκταση της σειράς Fourier που προκύπτει όταν η περίοδος της συνάρτησης που εκπροσωπεί επιμηκύνεται και αφήνεται να προσεγγίσει το άπειρο. Με τη χρησιμοποίηση του Fast Fourier Transform (FFT) μπορούμε να μεταβούμε από τον χώρο των αριθμών (space domain) στο χώρο των συχνοτήτων (frequency domain). Αυτός ο τρόπος δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού διαφόρων ποσοτήτων ταχύτερα και βρίσκει εφαρμογή σε πολλές επιστήμες.

Ο FFT χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές γεωδαισίας μεταξύ των οποίων είναι οι τοπογραφικές διορθώσεις στις μετρήσεις βαρύτητας και στις κατακόρυφες βαθμίδες της βαρύτητας, στον υπολογισμό των υψομέτρων του γεωειδούς και αποκλίσεων της κατακορύφου κ.ά. Στο σύνολο αυτών των εφαρμογών επιλύονται συνελικτικά ολοκληρώματα της Φυσικής Γεωδαισίας μέσω του θεωρήματος της συνέλιξης.

Άμεση εφαρμογή εφαρμογή έχει ο FFT στον υπολογισμό υψομέτρων του γεωειδούς γνωρίζοντας το αζιμούθιο α και την απόσταση s σε ένα επίπεδο σύστημα συντεταγμένων ανάμεσα σε ένα τυχαίο σημείο των δεδομένων και το σημείο υπολογισμού P (Κατσάμπαλος και Τζιαβός 1991).

$$N = \frac{1}{2\pi\gamma} \int_{s=0}^{s_{max}} \int_{\alpha=0}^{2\pi} \frac{\Delta g}{s} s \, ds d\alpha \quad (3.17)$$

όπου Δg είναι οι ανωμαλίες της βαρύτητας και γ η κανονική βαρύτητα.

Εκφράζοντας τα $ds d\alpha$ σε επίπεδες συντεταγμένες x, y έχουμε:

$$N = \frac{1}{2\pi\gamma} \int_{-X}^X \int_{-\gamma}^{\gamma} \Delta g(x, y) \frac{1}{[(x_p - x)^2 + (y_p - y)^2]^{1/2}} dx dy \quad (3.18)$$

Η παραπάνω σχέση είναι το ολοκλήρωμα του Stokes σε επίπεδη προσέγγιση και περιέχει στο 2° μέλος της ένα συνελικτικό ολοκλήρωμα. Χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους συμβολισμούς

$$l_N(x, y) = r^{-1}(x, y) = (x^2 + y^2)^{-1/2} \quad (3.19)$$

η εξίσωση (3.18) λαμβάνει τελικά τη μορφή:

$$N = \frac{1}{2\pi\gamma} \Delta g(x, y) * l_N(x, y) \quad (3.20)$$

Έτσι, για τον υπολογισμό των συνελίξεων και λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες των μετασχηματισμών Fourier το υψόμετρο του γεωειδούς δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις (Κατσάμπαλος και Τζιαβός 1991):

$$N(x, y) = \frac{1}{2\pi\gamma} \mathbf{F}^{-1}\{\Delta G(u, v)L_N(u, v)\} \quad (3.21)$$

Όπου $\Delta G(u, v) = \mathbf{F}\{\Delta g(x, y)\}$

$$L_N(u, v) = \mathbf{F}\{L_N(x, y)\} = (u^2 + v^2)^{-1/2} \quad (3.22)$$

Τελικά, το υψόμετρο του γεωειδούς υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση

$$N(x, y) = \frac{1}{2\pi\gamma} \mathbf{F}^{-1}[\Delta G(u, v) \frac{1}{(u^2 + v^2)^{-1/2}}] \quad (3.23)$$

Τα σύμβολα \mathbf{F} και \mathbf{F}^{-1} παριστάνουν τον ευθύ και τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier αντιστοίχως. Με κεφαλαία γράμματα παριστάνονται τα φάσματα των αντιστοίχων ποσοτήτων στις ανωτέρω εξισώσεις. Η συνάρτηση πυρήνας στην εξίσωση (3.18) είναι το αντίστροφο της τετραγωνικής ρίζας της απόστασης σε επίπεδη προσέγγιση. Επίσης, u, v είναι οι αντίστοιχες συχνότητες των x, y .

Ο αριθμητικός υπολογισμός της σχέσης (3.22) πραγματοποιήθηκε στα αριθμητικά πειράματα της παρούσας εργασίας μέσω του προγράμματος GEOFOUR του λογισμικού GRAVSOFT, όπως σχολιάζεται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Εκτός της επίπεδης προσέγγισης του ολοκληρώματος του Stokes (εξίσωση 3.18), το ολοκλήρωμα αυτό μπορεί να δοθεί και στην κλασική σφαιρική εκδοχή (ολοκλήρωμα Stokes για σφαιρική Γη). Στην περίπτωση αυτή είναι

$$N(\varphi_P, \lambda_P) = \frac{R}{2\pi\gamma_m} \iint_E \Delta g(\varphi, \lambda) S(\varphi_P, \lambda_P, \varphi, \lambda) d\varphi d\lambda \quad (3.23a)$$

Όπου S η εξίσωση πυρήνας του Stokes σε σφαιρική προσέγγιση.

Στην παρούσα εργασία, η εξίσωση (3.23a) υλοποιήθηκε στα αριθμητικά πειράματα μέσω του προγράμματος SPFOUR του λογισμικού GRAVSOFT και τα αποτελέσματα σχολιάζονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Η τεχνική FFT για την αριθμητική επίλυση του ολοκληρώματος Stokes εκτός του σημαντικού πλεονεκτήματος της ταχύτητας στη διαχείριση μεγάλου αριθμού δεδομένων, απαιτεί τα δεδομένα να είναι διαθέσιμα σε πλέγμα.

3.3. Συστήματα Εισόδου – Εξόδου

Πολλά από τα προβλήματα που εξετάζει η επιστήμη της γεωδαισίας και πιο συγκεκριμένα οι εφαρμογές του πεδίου βαρύτητας αντιμετωπίζονται στον χώρο των αριθμών (space domain) με τη χρήση της σημειακής προσαρμογής. Σε πολλές περιπτώσεις, όμως, μεγάλου όγκου δεδομένων οδηγούμαστε σε ανεπίλυτα προβλήματα. Τέτοιου είδους καταστάσεις αντιμετωπίζονται με τη θεωρία συστημάτων και των αλγορίθμων πολλαπλής εισόδου-εξόδου (Input Output System Theory) (Sanso and Sideris 1995).

Παρακάτω δίνονται κάποιες κατηγορίες συστημάτων εισόδου-εξόδου (Τζιαβός 2002):

- Σύστημα απλής εισόδου-εξόδου χωρίς θόρυβο. Στην περίπτωση αυτή θεωρούμε ένα ιδανικό σήμα που περιγράφεται από τη συνάρτηση $s(x,y)$, στο οποίο υπάρχει μηδενικός θόρυβος, το οποίο φιλτράρουμε με μία συνάρτηση φίλτρο $h(x,y)$ και παράγεται ένα σήμα που περιγράφεται από τη σχέση $f(x,y)$. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται με την παρακάτω σχέση:

$$g(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x_o, y_o) f(x - x_o, y - y_o) dx_o dy_o \quad (3.24)$$

όπου (x_o, y_o) είναι τα σημεία όπου η συνάρτηση $h(x,y)$ παίρνει μη μηδενικές τιμές. Επίσης, προκύπτουν οι συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης R_{gg} του σήματος $g(x,y)$ και διασυσχέτισης R_{gf} των σημάτων $f(x,y)$ και $g(x,y)$

$$R_{gg}(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x_1, y_1) h(x_2, y_2) R_{ff}(x + x_1 - x_2, y + y_1 - y_2) dx_1 dx_2 dy_1 dy_2 \quad (3.25)$$

$$R_{gf}(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x_1, y_1) R_{ff}(x - x_1, y - y_1) dx_1 dy_1 \quad (3.26)$$

Με τη χρήση των μετασχηματισμών Fourier για τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει

$$P_{gg}(u, v) = |H(u, v)|^2 P_{ff}(u, v) \quad (3.27)$$

$$P_{gf}(u, v) = |H(u, v)| P_{ff}(u, v) \quad (3.28)$$

Όπου $|H(u, v)|$ ο μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης φίλτρου $h(x, y)$, η οποία ονομάζεται συνάρτηση απόκρισης συχνότητας ή συνάρτηση μετάδοσης φίλτρου και P_{gg} , P_{ff} και P_{gf} οι συναρτήσεις πυκνότητας (Power Spectral Density functions - PSD) των συναρτήσεων g , f , h .

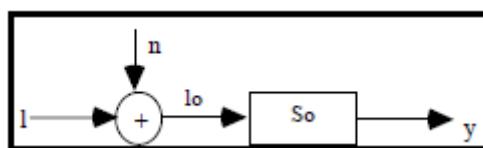
Η συνάρτηση συντονισμού συνδέει επίσης τις δύο συναρτήσεις εισόδου-εξόδου g και f και δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma_{gf}^2 = \frac{|P_{gf}(u, v)|^2}{P_{ff}(u, v) P_{gg}(u, v)} \quad (3.29)$$

Με πεδίο ορισμού $0 \leq \gamma_{gf}^2 \leq 1$

➤ **Σύστημα εισόδου-εξόδου με θόρυβο.** Η περίπτωση αυτή σχετίζεται με την παραπάνω με τη διαφορά ότι στο σήμα αυτό υπάρχει θόρυβος και αντιμετωπίζεται στοχαστικά. Το σήμα αναλύεται στο καθαρό μέρος και στον θόρυβο. Η ανάλυση του σήματος για ένα σύνολο μετρήσεων $l_i, i = 1, 2, \dots, n$, δίνεται από την παρακάτω σχέση (Τζιαβός 2002):

$$l_i = s_i + n_i \quad (3.30)$$



Εικόνα 3.6 Σύστημα εισόδου-εξόδου με θόρυβο (Τζιαβός 2002)

Στο παραπάνω σύστημα εισόδου εξόδου για την ανάλυση του πρωτογενούς σήματος έχουμε:

$$l = (s + n) * s_o = l_0 * s_o \quad (3.31)$$

Η οποία στο χώρο των συχνοτήτων με τη χρήση του μετασχηματισμού Fourier γίνεται:

$$\mathbf{F}\{l\} = (\mathbf{F}\{s\} + \mathbf{F}\{n\}) * \mathbf{F}\{s_o\}_o = \mathbf{F}\{l_0\} * \mathbf{F}\{s_o\} \quad (3.32)$$

Οι συναρτήσεις πυκνότητας φάσματος που αναφέρθηκαν παραπάνω υπολογίζονται με δύο βασικές αριθμητικές μεθόδους. Η άμεση μέθοδος, η οποία χρησιμοποιεί τα διαθέσιμα δεδομένα, και τα PSD που παράγει χαρακτηρίζονται ανισοτροπικά (Τζιαβός et al 1996) και η έμμεση μέθοδος κατά την οποία οι συναρτήσεις πυκνότητας φάσματος προκύπτουν από τον ευθύ μετασχηματισμό Fourier των συναρτήσεων συμμεταβλητότητας.

Η άμεση μέθοδος, γνωστή στη βιβλιογραφία και ως μέθοδος του περιοδικού διαγράμματος (Marple 1987), δίνει μία εκτίμηση του PSD δύο συναρτήσεων $f_1(x, y), f_2(x, y)$ από τη σχέση

$$\hat{P}_{12}(m, n) = \frac{1}{T_x T_y} \{F_1^*(m, n) F_2(m, n)\}, \quad (3.33)$$

Όπου $*$ σημαίνει το συζυγή μιγαδικό.

Για δύο τυχαίες μεταβλητές x, y η συνάρτηση πυκνότητας φάσματος ορίζεται ως εξής (Τζιαβός 2002):

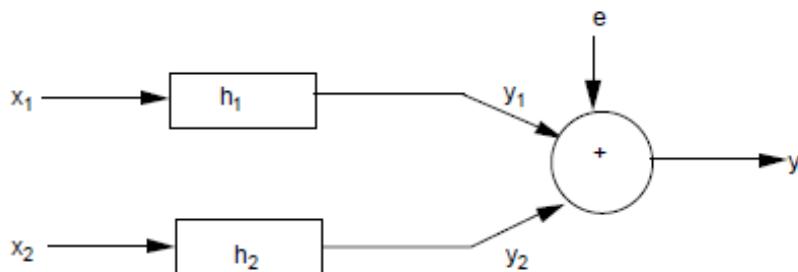
$$P_{xy} = E\{\mathbf{F}\{X\}[\mathbf{F}\{Y\}]^*\} = E\{XY^*\} = \mathbf{F}\{C_{xy}\} \quad (3.34)$$

Με E να παριστάνεται η προσδοκώμενη τιμή και C_{xy} η συνάρτηση μεταβλητότητας των δύο τυχαίων μεταβλητών.

Στην έμμεση μέθοδο τα PSD's που προκύπτουν ονομάζονται *ισοτροπικά* (Τζιαβός et al 1996) και για τον υπολογισμό τους θα πρέπει να γνωρίζουμε είτε τη συνάρτηση συσχέτισης είτε τη συνάρτηση συμμεταβλητότητας και μέσω ενός μετασχηματισμού Fourier να υπολογίσουμε τα PSD's:

$$\hat{P}_{12}(m, n) = F\{C_{1,2}(k, l)\} \quad (3.35)$$

Η περίπτωση η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στη Γεωδαισία και ως σκοπό έχει το συνδυασμό ετερογενών δεδομένων, συνήθως ανωμαλίες βαρύτητας στη θάλασσα και υψόμετρα του γεωειδούς από δορυφορική αλτιμετρία, είναι αυτή της διπλής εισόδου/απλής εξόδου όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Τζιαβός 2002).



Εικόνα 3.7 Σύστημα διπλής εισόδου-απλής εξόδου (Τζιαβός 2002)

Στα αριθμητικά πειράματα της εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα διπλής εισόδου/απλής εξόδου. Δεδομένα εισόδου σε πλέγμα 2arcmin ήταν (α) SLA προερχόμενα από τη λύση LSC και (β) υπόλοιπα των ανωμαλιών βαρύτητας από τη βάση βαρύτητας της Κρήτης και υπολογίσθηκαν υψόμετρα του γεωειδούς για την περιοχή μελέτης σε πλέγμα 2arcmin. Τα αποτελέσματα σχολιάζονται διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο και σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των υπολογίτων αλγορίθμων.

4. Προσδιορισμός μοντέλων βαρύτητας, γεωειδούς, μέσης στάθμης θάλασσας και τοπογραφίας

4.1. Υπολογισμός ανωμαλιών στάθμης θάλασσας με τη χρήση φασματικών μεθόδων

Πέραν από τους υπολογισμούς των υπολοίπων υψομέτρων του γεωειδούς, όπως αυτοί παρουσιάστηκαν στην παρούσα εργασία με ιδιαίτερη αναφορά στη μέθοδο της σημειακής προσαρμογής (LSC) (βλ. κεφάλαιο 2.2 και 3.1), ο προσδιορισμός του γεωειδούς υπολογίστηκε και με φασματικές μεθόδους με τη χρήση FFT. Επίσης, τα προαναφερθέντα υπόλοιπα υψόμετρα του γεωειδούς για την περιοχή μελέτης υπολογίσθηκαν και με τη χρήση συστημάτων διπλής εισόδου – εξόδου. Στην τεχνική αυτή τα δεδομένα εισόδου πρέπει να δίδονται με τη μορφή πίνακα-πλέγματος άρτιου αριθμού γραμμών και στηλών ώστε να αξιοποιούνται τα πλεονεκτήματα ταχύτητας του FFT (βλ. κεφάλαιο 3.3). Ως είσοδοι δόθηκαν αφενός τα υπόλοιπα υψόμετρα του γεωειδούς όπως υπολογίσθηκαν με τη μέθοδο LSC και αφ' ετέρου τα υπόλοιπα των ανωμαλιών βαρύτητας της βάσης ανωμαλιών βαρύτητας της Κρήτης (Tziavos et al. 2013) (βλ. κεφάλαιο 4.7). Η έξοδος του συστήματος ήταν υψόμετρα του γεωειδούς για βαθμούς 1834 και 2160, όπως φαίνονται στον πίνακα 4.1. Οι PSD συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τυχαίου θορύβου τόσο για τη βαρύτητα όσο και τα υψόμετρα του γεωειδούς.

Επίσης, για τον υπολογισμό των υπολοίπων υψομέτρων του γεωειδούς (SLA) από ανωμαλίες βαρύτητας χρησιμοποιήθηκε το ολοκλήρωμα του Stokes. Ως είσοδος οι ανωμαλίες βαρύτητας πρέπει να αναφέρονται σε πλέγμα με την ίδια ή διαφορετική ισοδιάσταση κατά x και κατά y (Αραμπέλος και Τζιαβός, 2007). Παρακάτω περιγράφεται η εφαρμογή του ολοκληρώματος του Stokes, η οποία για το επίπεδο έχει την παρακάτω μορφή.

$$N(x, y) = \frac{R}{2\pi\gamma_m} \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y \frac{\Delta g(x, y)}{r} dx dy \quad (4.1)$$

Όπου

$$r = \sqrt{(x_p - x)^2 + (y_p - y)^2} \quad (4.2)$$

είναι η γεωμετρική απόσταση μεταξύ του σημείου υπολογισμού P και ενός τυχαίου σημείου του πλέγματος. Οι παραπάνω υπολογισμοί για την περίπτωση του επιπέδου έγιναν με τη χρήση του προγράμματος GEOFOUR του λογισμικού GRAVSOFT (βλ. κεφ. 3.1).

Στην περίπτωση κατά την οποία οι υπολογισμοί αναφέρονται σε μεγάλη έκταση δύναται να αξιοποιηθεί η σφαιρική προσέγγιση του ολοκληρώματος του Stokes με την τεχνική FFT. Η ολοκληρωματική εξίσωση της περίπτωσης αυτής παρουσιάζεται παρακάτω (Αραμπέλος και Τζιαβός, 2007):

$$N(\varphi_p, \lambda_p) = \frac{R}{2\pi\gamma_m} \iint_E \Delta g(\varphi, \lambda) S(\varphi_p, \lambda_p, \varphi, \lambda) d\varphi d\lambda \quad (4.3)$$

Οι παραπάνω υπολογισμοί για την περίπτωση του επιπέδου έγιναν με τη χρήση του προγράμματος SPFOUR του λογισμικού GRAVSOFT (βλ. κεφ. 3.1)..

Παρακάτω παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των SLA που προέκυψαν από φασματικές τεχνικές, καθώς επίσης και από τη μέθοδο LSC (βλ. πίνακα 4.1). Στην περίπτωση της LSC η πρόγνωση έγινε στο πλέγμα των 2arcmin με είσοδο τα αρχικά δεδομένα του CRYOSAT-2 στην πρωτογενή μορφή κατά μήκος των τροχιακών ιχνών. Στην περίπτωση του Stokes τα υπόλοιπα των ανωμαλιών βαρύτητας από τη βάση βαρύτητας της Κρήτης δίνονται ως είσοδος, ώστε να υπολογιστούν τα SLA. Κατά την περίπτωση των συστημάτων εισόδου – εξόδου ως είσοδος δίνονται τα υπόλοιπα των ανωμαλιών βαρύτητας όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα, καθώς επίσης και τα SLA που προέκυψαν με τη μέθοδο LSC. Παρακάτω παρουσιάζονται όλα τα προαναφερθέντα στατιστικά.

Στατιστικά χαρακτηριστικά (m) των SLA					
Model	Mean	Min	Max	RMS	Std
LSC 1834	-0.013	-0.219	0.176	0.057	0.055
LSC 2160	-0.014	-0.192	0.161	0.053	0.051
GEOFOUR 1834	0	-0.805	0.172	0.105	0.105
GEOFOUR 2160	0	-0.801	0.16	0.104	0.104
SPFOUR 1834	0	-0.795	0.166	0.106	0.106
SPFOUR 2160	0	-0.795	0.157	0.106	0.106
INPUT/OUTPUT 1834	-0.030	-0.139	0.053	0.041	0.027
INPUT/OUTPUT 2160	-0.031	-0.126	0.042	0.040	0.025

Πίνακας 4.1 Στατιστικά χαρακτηριστικά SLA από φασματικές τεχνικές

Όπως παρατηρείται στον Πίνακα 4.1, τα SLA που προέκυψαν με τη μέθοδο LSC παρουσιάζουν μέση τιμή της τάξεως των -1.4 cm για βαθμό 2160 και -1.3 cm για βαθμό 1834. Οι ελάχιστες τιμές βρίσκονται στα -19.2 και -21.9 cm αντίστοιχα με τις μέγιστες να είναι 16 και 17.6 cm. Σε ίδια επίπεδα κυμαίνονται και οι τυπικές τους αποκλίσεις στα 5 cm περίπου για βαθμό 2160 και μέσο τετραγωνικό σφάλμα στα 5.3 cm. Στην περίπτωση του Stokes για την εφαρμογή στο επίπεδο παρατηρούνται αρκετά μεγάλες τιμές όσον αφορά τα ελάχιστα, στα -80 cm, με μέσες τιμές να είναι μηδενικές και οι τυπικές αποκλίσεις για βαθμό 1834 και 2160 να είναι στα 10.5 cm. Οι μέγιστες τιμές των περιπτώσεων αυτών είναι στα 16 cm περίπου. Στην περίπτωση της σφαιρικής προσέγγισης δεν παρατηρούνται αλλαγές και οι ελάχιστες τιμές είναι στα -79.5 εκατοστά για βαθμό 1834 αλλά και 2160, οι μέγιστες όπως και προηγουμένως στα 16 περίπου εκατοστά με μέση τιμή μηδενική. Η σύμπτωση των αποτελεσμάτων επίπεδης και σφαιρικής προσέγγισης αποδίδεται στην περιορισμένη έκταση της περιοχής μελέτης. Η τυπική απόκλιση και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα βρίσκεται στα 10.6 cm. Όσον αφορά τα συστήματα εισόδου εξόδου παρατηρείται μέση τιμή στα 3 cm με την αντίστοιχη τυπική απόκλιση στα 2.5 cm περίπου και για την περίπτωση βαθμού 1834, αλλά και 2160. Οι ελάχιστες τιμές της μεθόδου αυτής βρίσκονται στα -13 εκατοστά και οι μέγιστες στα 5 εκατοστά περίπου.

Στη συνέχεια αφαιρέθηκαν με τη χρήση της GMT όλα τα δεδομένα της στεριάς, τα οποία καθότι προέρχονται από τα αρχικά δεδομένα του CRYOSAT-2 από τη θάλασσα είναι λογικό να μην παρουσιάζουν απόλυτα σωστές τιμές. Στον πίνακα 4.2

παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά μόνο για την θαλάσσια περιοχή μελέτης.

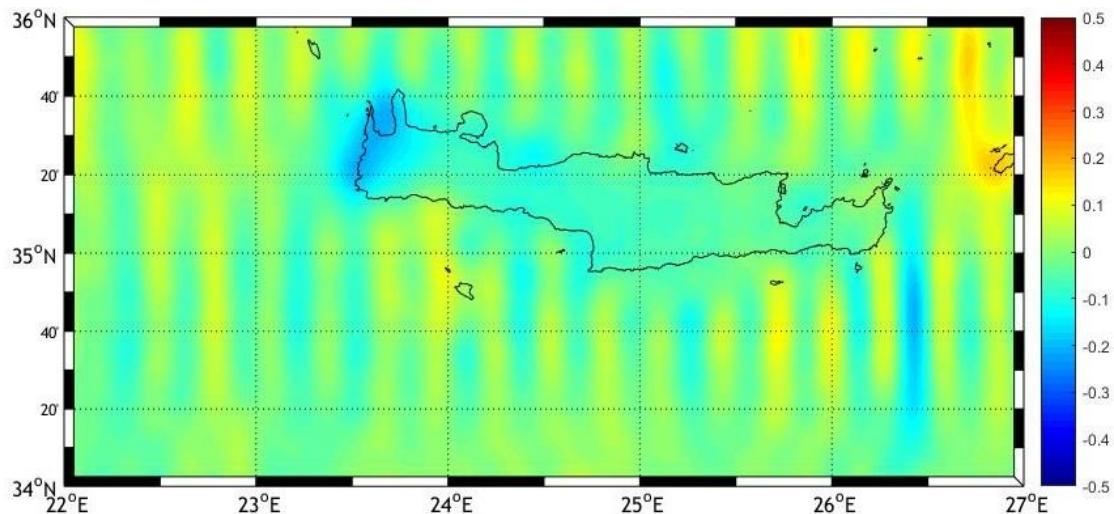
Στατιστικά χαρακτηριστικά (m) των SLA - Θαλάσσια περιοχή					
Model	Mean	Min	Max	RMS	Std
LSC 1834	-0.008	-0.219	0.176	0.054	0.053
LSC 2160	-0.010	-0.192	0.161	0.050	0.049
GEOFOUR 1834	0.021	-0.408	0.172	0.077	0.0739
GEOFOUR 2160	0.021	-0.366	0.160	0.076	0.073
SPFOUR 1834	0.022	-0.411	0.166	0.078	0.075
SPFOUR 2160	0.022	-0.372	0.157	0.077	0.074
INPUT/OUTPUT 1834	-0.028	-0.139	0.053	0.038	0.027
INPUT/OUTPUT 2160	-0.028	-0.126	0.042	0.038	0.025

Πίνακας 4.2 Στατιστικά χαρακτηριστικά SLA από φασματικές τεχνικές μόνο για τη θαλάσσια περιοχή

Όπως φαίνεται στον πίνακα 4.2, στην περίπτωση των δεδομένων μόνο στη θάλασσα, οι ακραίες τιμές που παρουσιάζονται στην τεχνική Stokes (GEOFOUR, SPFOUR) και κυμαίνονται στα -80 cm παρουσιάζουν μεγάλη μείωση και πλέον βρίσκονται στα -40 cm για την περίπτωση της επίπεδης προσέγγισης και για βαθμό 1834 και -41 εκατοστά για βαθμό 2160. Αντίστοιχα, για την περίπτωση της σφαιρικής προσέγγισης παρατηρείται μείωση στα -36 και -37 cm αντίστοιχα για βαθμούς 1834 και 2160. Επίσης, μείωση παρατηρείται σε κάθε περίπτωση στις τυπικές αποκλίσεις. Για τις περιπτώσεις της τεχνικής Stokes υπάρχει μείωση στην τυπική απόκλιση κατά 3 cm περίπου για κάθε χωρική περίπτωση και κάθε βαθμό. Επιπρόσθετα, όσον αφορά τις μέσες τιμές, παρατηρούμε πως για τη θαλάσσια περιοχή η μέση τιμή για τις περιπτώσεις των φασματικών τεχνικών με Stokes από μηδενικές τιμές αυξάνεται στα 2 cm περίπου, τη στιγμή που στις υπόλοιπες τεχνικές που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2 υπάρχει μία ελαφρά πτώση της τάξεως του ενός εκατοστού. Όσον αφορά τα συστήματα εισόδου εξόδου μοιάζουν ανεπηρέαστα, καθώς η μόνη μεταβολή που παρατηρείται είναι μία μείωση της τάξεως του 0.5 cm στη μέση τιμή.

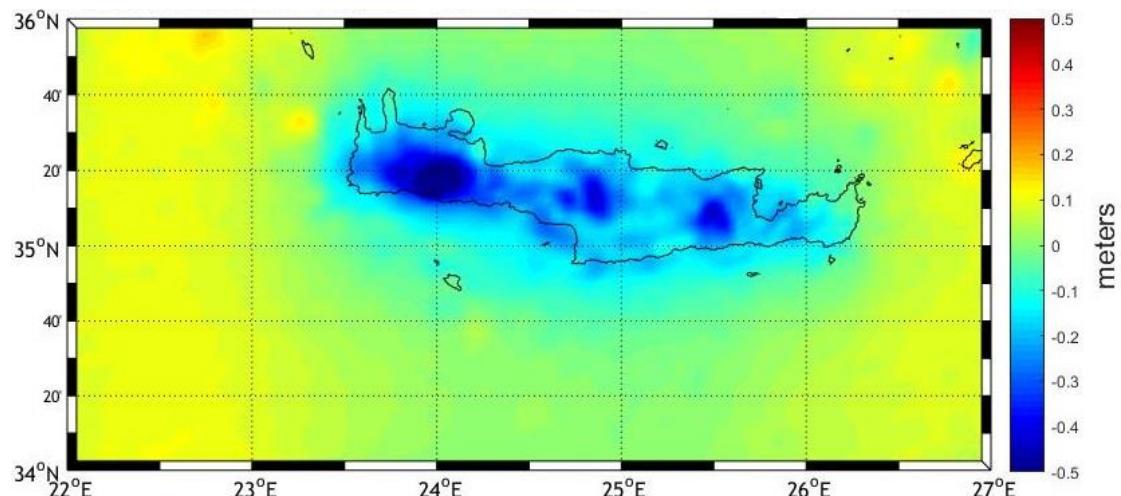
Παρακάτω παρουσιάζονται γραφικές αναπαραστάσεις για τα δεδομένα SLA για κάθε μία από τις παραπάνω τεχνικές.

Στην εικόνα 4.1 δίνεται η αναπαράσταση των SLA, όπως αυτά προέκυψαν με τη μέθοδο LSC για βαθμό 1834.



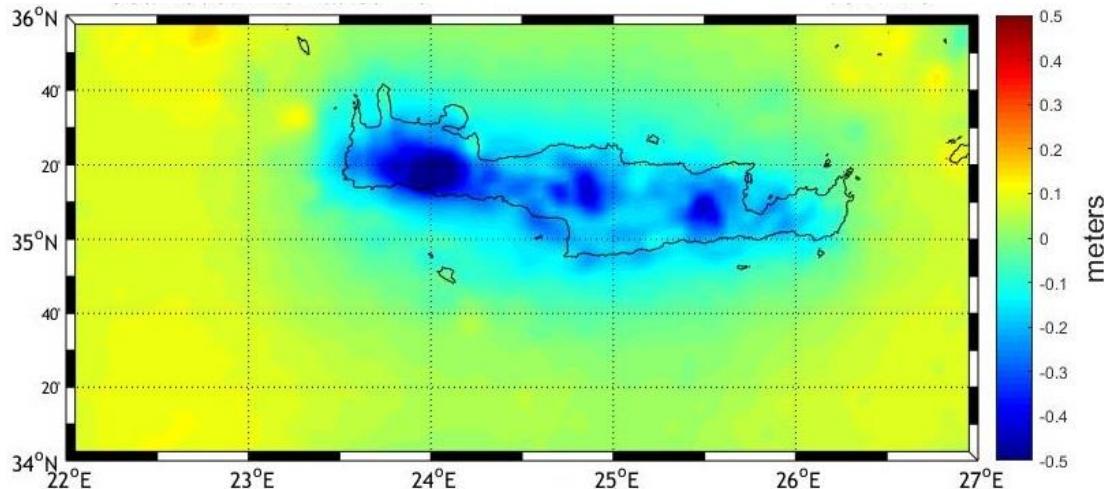
Εικόνα 4.1 SLA από μέθοδο LSC για βαθμό 1834

Κατόπιν, στην εικόνα 4.2 δίνεται το μοντέλο των SLA που προέκυψαν από τα υπόλοιπα των ανωμαλιών βαρύτητας της βάσης των δεδομένων βαρύτητας της Κρήτης με τη χρήση του ολοκληρώματος Stokes με το πρόγραμμα GEOFOUR για βαθμό 2160.



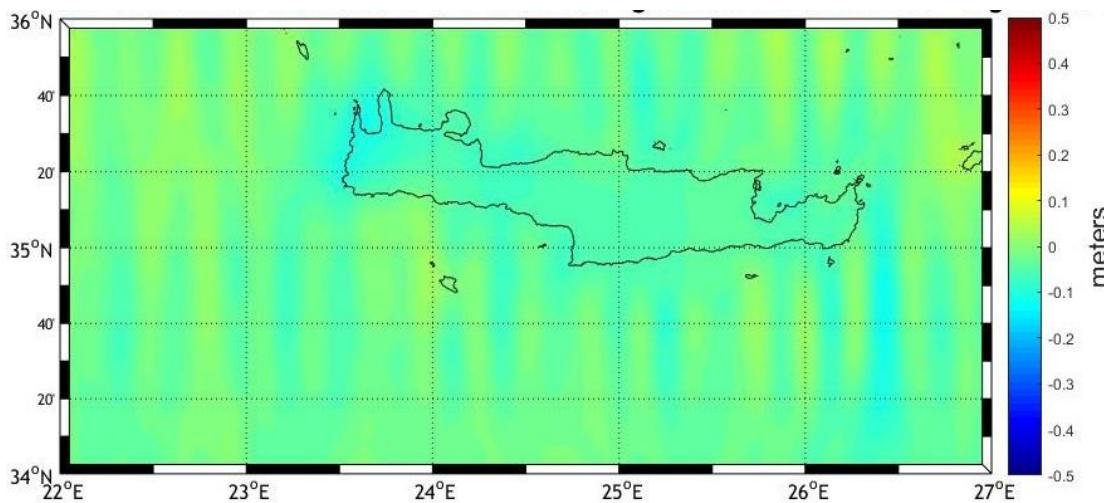
Εικόνα 4.2 SLA από Geofour για βαθμό 2160

Στη συνέχεια ακολουθεί το μοντέλο με τα SLA που προέκυψε από την τεχνική με το ολοκλήρωμα του Stokes για την σφαιρική προσέγγιση για βαθμό 2160 με τη χρήση του προγράμματος SPFOUR.



Εικόνα 4.3 SLA από SPFOUR για βαθμό 2160

Τέλος, παρουσιάζεται το αποτέλεσμα των υπολοίπων των SLA με τη χρήση συστημάτων εισόδου – εξόδου για βαθμό 2160.



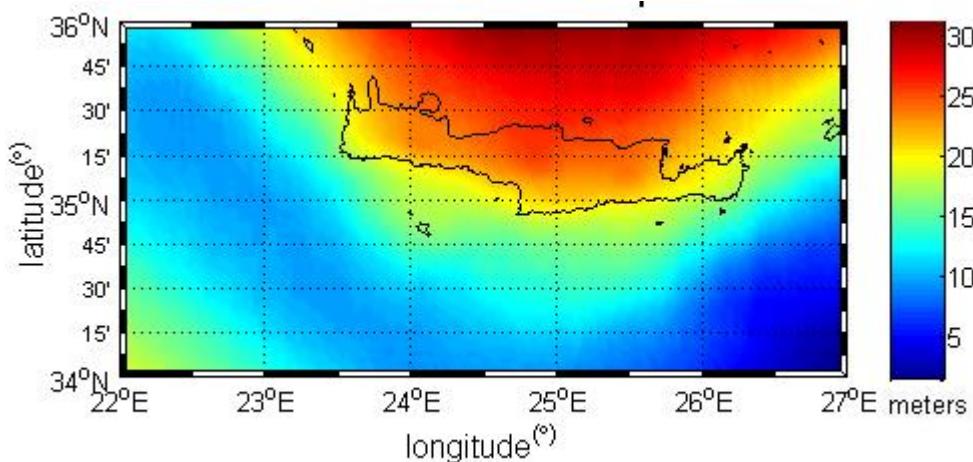
Εικόνα 4.4 SLA από συνδυασμό SLA LSC και υπολοίπων των ανωμαλιών βαρύτητας από τη βάση της Κρήτης μέσω συστήματος εισόδου-εξόδου (I/O systems) για βαθμό 2160

4.2. Μοντέλα Μέσης Στάθμης της Θάλασσας

Στο παρόν τμήμα της εργασίας παρουσιάζονται τα μοντέλα Μέσης Στάθμης Θάλασσας που υπολογίσθηκαν με τη συνεισφορά του παγκόσμιου γεωδυναμικού μοντέλου EGM2008 για την περιοχή μελέτης, το οποίο υπολογίσθηκε για την περιοχή μελέτης με το λογισμικό harmonic_synth, και των δεδομένων SLA της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2 που προέκυψαν από τις προγνώσεις στο πλέγμα 2arcmin.

Η πρώτη περίπτωση που εξετάζεται περιλαμβάνει την πρόγνωση των SLA με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής και σχολιάζεται στη συνέχεια.

Παρατηρούμε ότι στις περιοχές βόρεια της Κρήτης τα υψόμετρα της ΜΣΘ παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές τους. Διατρέχοντας την περιοχή νοτιότερα τα υψόμετρα λαμβάνουν μικρότερες τιμές και ιδιαίτερα στην περιοχή νοτιοανατολικά της Κρήτης, όπου η αναπαράσταση των SLA έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, όπως θα φανεί και στις συγκρίσεις εξωτερικής ακρίβειας των μοντέλων του γεωειδούς.



Εικόνα 4.5 Μοντέλο ΜΣΘ από πρόγνωση γραμμικής παρεμβολής

Μοντέλο ΜΣΘ (SSH) (m) που προέκυψε από πρόγνωση με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής

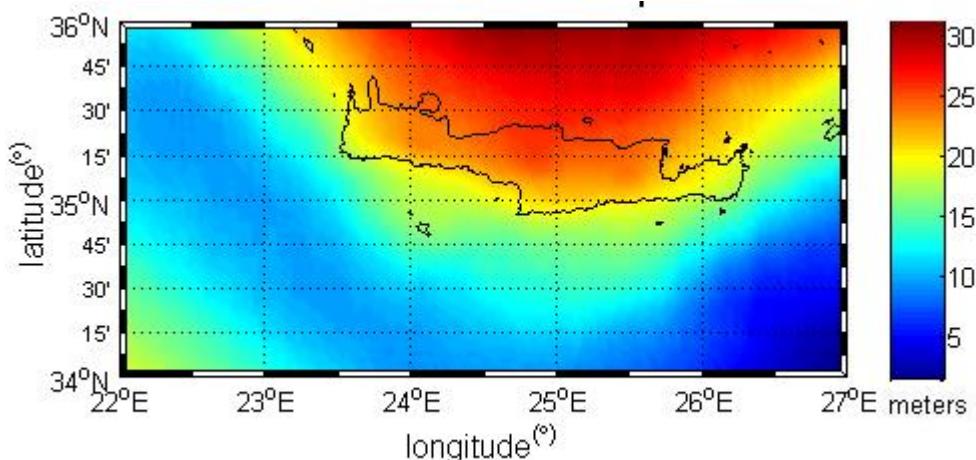
Δεδομένα: N (EGM2008) + SLA (CRYOSAT-2)

Mean	Min	Max	RMS	Std
15.718	1.504	31.040	17.162	± 2.106

Πίνακας 4.3 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου ΜΣΘ από πρόγνωση με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής

Παρατηρώντας τον πίνακα των στατιστικών χαρακτηριστικών της περίπτωσης της γραμμικής παρεμβολής βλέπουμε ότι η μέση τιμή είναι 15.718 m και η τυπική απόκλιση ± 2.106 m. Η μέγιστη τιμή παρατηρείται στην περιοχή βόρεια της Κρήτης και έχει τιμή 31.04 m. Η ελάχιστη τιμή, 1.504 m παρουσιάζεται νοτιοανατολικά της Κρήτης.

Παρακάτω παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του μοντέλου ΜΣΘ που υπολογίσθηκε με τη μέθοδο της διγραμμικής παρεμβολής και τα στατιστικά στοιχεία της.



Εικόνα 4.6 Μοντέλο ΜΣΘ από πρόγνωση διγραμμικής παρεμβολής

Μοντέλο ΜΣΘ (SSH) (m) που προέκυψε από πρόγνωση με τη μέθοδο της διγραμμικής παρεμβολής

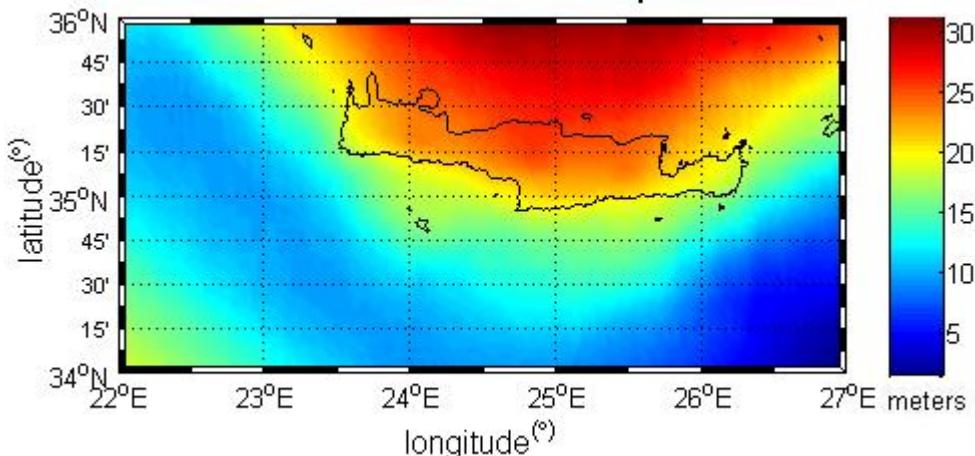
Δεδομένα: N (EGM2008) + SLA (CRYOSAT-2)

Mean	Min	Max	RMS	Std
15.714	1.402	30.991	17.158	± 2.108

Πίνακας 4.4 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου ΜΣΘ από πρόγνωση με τη μέθοδο της διγραμμικής παρεμβολής

Παρατηρώντας τον πίνακα των στατιστικών χαρακτηριστικών της περίπτωσης της διγραμμικής παρεμβολής βλέπουμε ότι η μέση τιμή είναι 15.714 m και η τυπική απόκλιση ± 2.108 m. Η μέγιστη τιμή παρατηρείται στην περιοχή βόρεια της Κρήτης και έχει τιμή 30.991 m. Η ελάχιστη τιμή, 1.402 m εμφανίζεται νοτιοανατολικά της Κρήτης.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το μοντέλο κυβικής παρεμβολής, που προέκυψε με το λογισμικό MATLAB, και τα στατιστικά χαρακτηριστικά της λύσης.



Εικόνα 4.7 Μοντέλο ΜΣΘ από πρόγνωση κυβικής παρεμβολής

Μοντέλο ΜΣΘ (SSH) (m) που προέκυψε από πρόγνωση με τη μέθοδο της κυβικής παρεμβολής

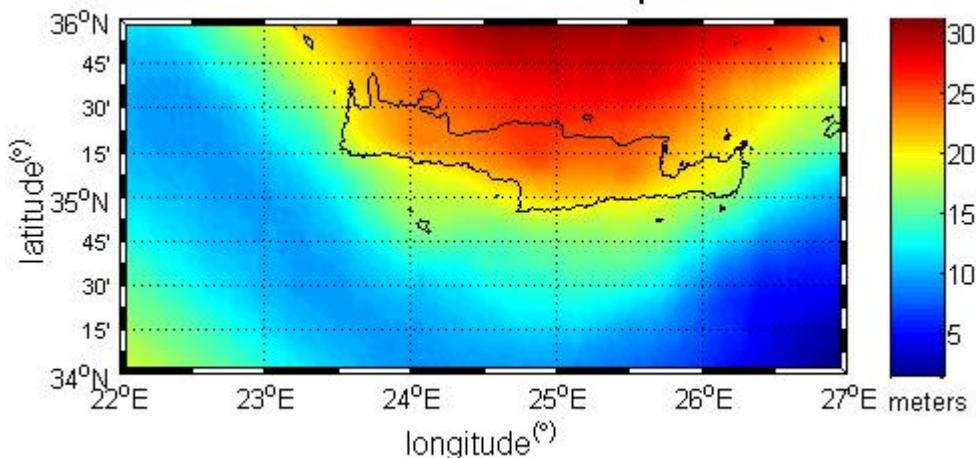
Δεδομένα: N (EGM2008) + SLA (CRYOSAT-2)

Mean	Min	Max	RMS	Std
15.718	1.504	31.040	17.162	± 2.106

Πίνακας 4.5 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου ΜΣΘ από πρόγνωση με τη μέθοδο της κυβικής παρεμβολής

Παρατηρώντας τον πίνακα των στατιστικών χαρακτηριστικών της περίπτωσης της κυβικής παρεμβολής βλέπουμε ότι η μέση τιμή είναι 15.718 m και η τυπική απόκλιση ± 2.106 m. Η μέγιστη τιμή παρατηρείται στην περιοχή βόρεια της Κρήτης και έχει τιμή 30.040 m. Η ελάχιστη τιμή του μοντέλου είναι 1.504 m.

Ακολουθεί το μοντέλο ΜΣΘ από πρόγνωση με τη μέθοδο kriging.



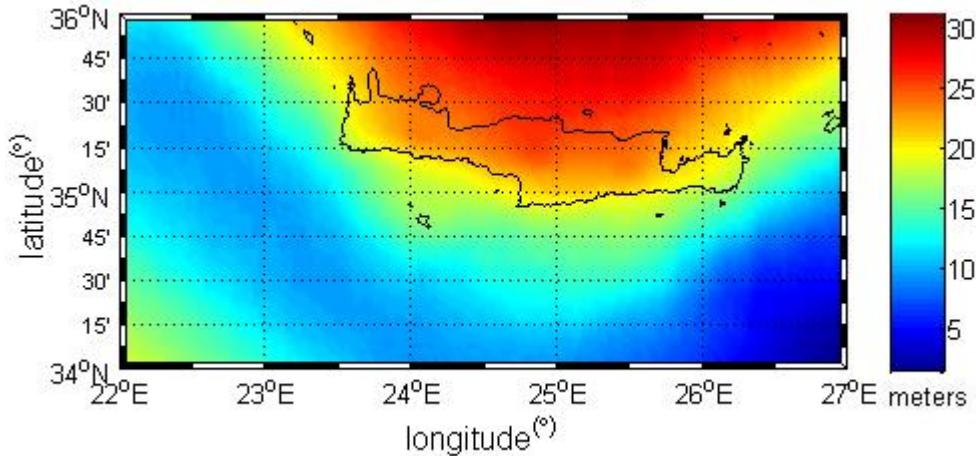
Εικόνα 4.8 Μοντέλο ΜΣΘ από πρόγνωση με τη μέθοδο kriging

Μοντέλο ΜΣΘ (SSH) (m) που προέκυψε από πρόγνωση με τη μέθοδο kriging				
Δεδομένα: N (EGM2008) + SLA (CRYOSAT-2)				
Mean	Min	Max	RMS	Std
15.754	1.478	31.042	17.193	± 2.103

Πίνακας 4.6 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου ΜΣΘ από πρόγνωση με τη μέθοδο kriging

Από τον πίνακα στατιστικών χαρακτηριστικών του μοντέλου kriging η μέση τιμή των υψομέτρων είναι 15.754 m και η τυπική απόκλιση στα ± 2.103 m. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα υπολογίστηκε στα 17.193 m με την μέγιστη τιμή των υψομέτρων να είναι στα 31.042 m και την ελάχιστη στα 1.478 m.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το μοντέλο για τη ΜΣΘ με τη μέθοδο LSC και ο αντίστοιχος πίνακας στατιστικών χαρακτηριστικών.



Εικόνα 4.9 Μοντέλο ΜΣΘ. από πρόγνωση με τη μέθοδο μέθοδο σημειακής προσαρμογής

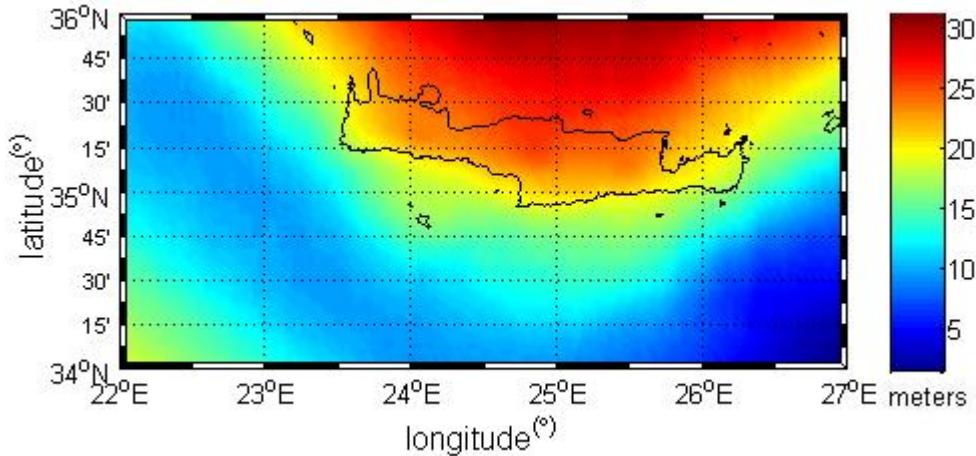
Μοντέλο ΜΣΘ (SSH) (m) που προέκυψε από πρόγνωση με τη μέθοδο σημειακής προσαρμογής Δεδομένα: N (EGM2008) + SLA (CRYOSAT-2)

Mean	Min	Max	RMS	Std
15.764	1.483	31.038	17.199	± 2.107

Πίνακας 4.7 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου ΜΣΘ από πρόγνωση με τη μέθοδο σημειακής προσαρμογής

Η μέση τιμή κυμαίνεται στα 15.764 m με την τυπική απόκλιση να είναι ± 2.107 m και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα 17.199 m. Ελάχιστη και μέγιστη τιμή των υψομέτρων της ΜΣΘ είναι 1.483 m και 31.038 m αντίστοιχα.

Παρακάτω παρουσιάζεται το μοντέλο ΜΣΘ που προέκυψε με πρόγνωση με τη μέθοδο πλησιέστερου σημείου με τη χρήση του λογισμικού MATLAB.



Εικόνα 4.10 Μοντέλο ΜΣΘ από πρόγνωση με τη μέθοδο μέθοδο πλησιέστερου σημείου

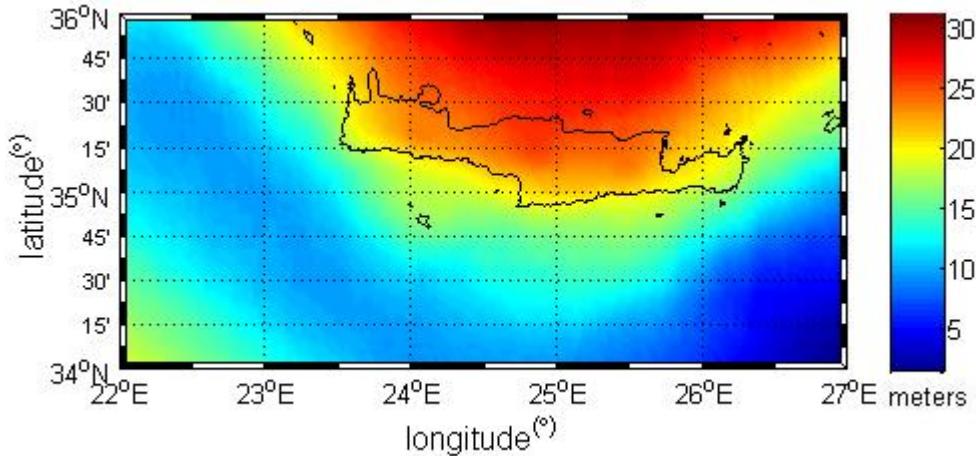
Μοντέλο ΜΣΘ (SSH) (m) που προέκυψε από πρόγνωση με τη μέθοδο πλησιέστερου σημείου Δεδομένα: N (EGM2008) + SLA (CRYOSAT-2)

Mean	Min	Max	RMS	Std
15.716	1.264	31.121	17.16	± 2.109

Πίνακας 4.8 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου ΜΣΘ από πρόγνωση με τη μέθοδο πλησιέστερου σημείου

Στην περίπτωση της προσέγγισης της ΜΣΘ με το μοντέλο πρόγνωσης πλησιέστερου σημείου η μέση τιμή βρίσκεται στα 15.716 m και η τυπική απόκλιση στα ίδια σχεδόν επίπεδα με τις προηγούμενες μεθόδους, στα ± 2.109 m. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι 17.16 m και η ελάχιστη τιμή των υψομέτρων είναι 1.264 m. Η μέγιστη τιμή των δεδομένων είναι 31.121 m.

Ακολουθεί το μοντέλο που προέκυψε από τη λύση του συστήματος διπλής εισόδου-απλής εξόδου με είσοδο υπόλοιπα γεωειδούς υπολογισμένα με τη μέθοδο LSC και υπόλοιπα της βαρύτητας από την υπάρχουσα βάση της Κρήτης.



Πίνακας 4.9 Μοντέλο ΜΣΘ από πρόγνωση με τη μέθοδο I/O system

Μοντέλο ΜΣΘ (SSH) (m) που προέκυψε από πρόγνωση με τη μέθοδο I/O system

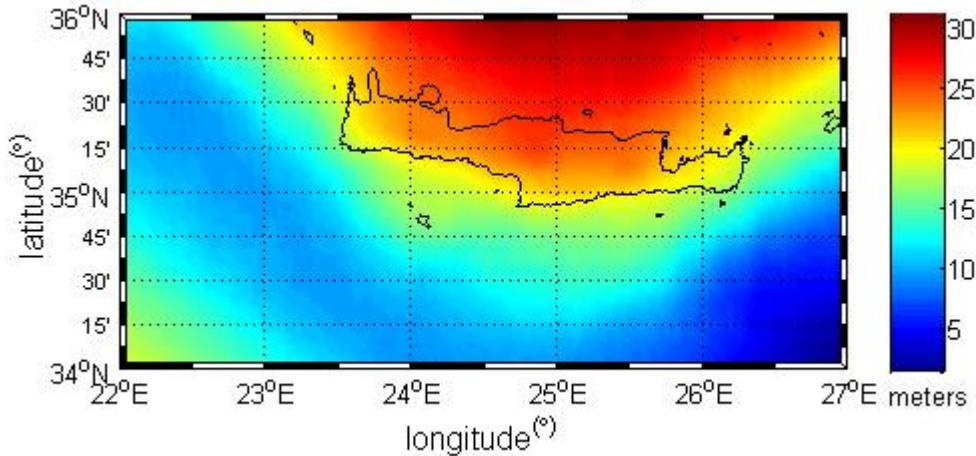
Δεδομένα: N (EGM2008) + SLA (CRYOSAT-2)

Mean	Min	Max	RMS	Std
15.748	1.588	31.011	17.185	± 2.104

Πίνακας 4.10 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου ΜΣΘ από πρόγνωση με τη μέθοδο I/O system

Από τον πίνακα στατιστικών χαρακτηριστικών παρατηρείται πως η μέση τιμή των υψομέτρων είναι 15.748 m και η τυπική απόκλιση στα ± 2.104 m. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα υπολογίστηκε στα 17.185 m με την μέγιστη τιμή των υψομέτρων να είναι στα 31.011 m και την ελάχιστη στα 1.453 m.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το μοντέλο ΜΣΘ που προέκυψε από την φασματική τεχνική με χρήση ολοκληρώματος του Stokes (βλ. εξίσωση 3.18) για την επίπεδη προσέγγιση μέσω GEOFOUR.



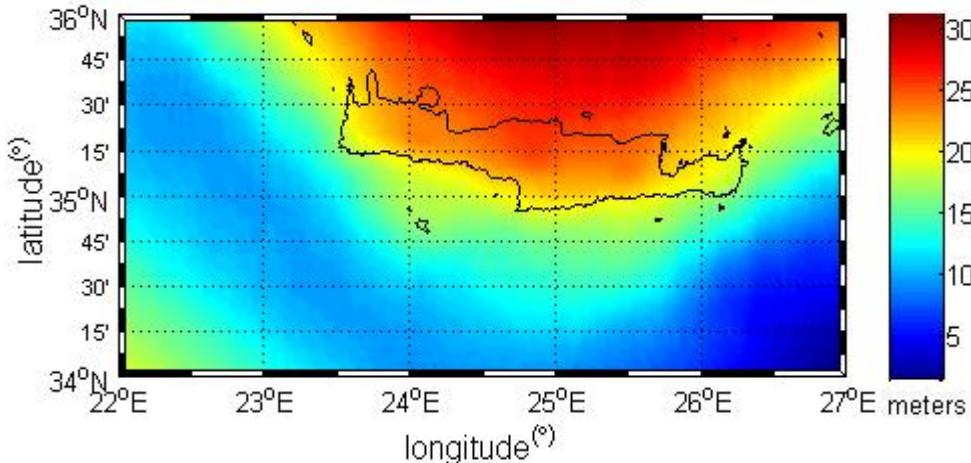
Πίνακας 4.11 Μοντέλο ΜΣΘ από πρόγνωση μέσω GEOFOUR

Μοντέλο ΜΣΘ (SSH) (m) που προέκυψε από πρόγνωση μέσω GEOFOUR Δεδομένα: N (EGM2008) + SLA (CRYOSAT-2)				
Mean	Min	Max	RMS	Std
15.778	1.587	31.038	17.194	± 2.093

Πίνακας 4.12 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου Μέσης Στάθμης Θάλασσας από πρόγνωση μέσω GEOFOUR

Από τον πίνακα στατιστικών χαρακτηριστικών παρατηρείται πως η μέση τιμή των υψομέτρων είναι 15.778 m και η τυπική απόκλιση στα ± 2.093 m. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα υπολογίστηκε στα 17.194 m με την μέγιστη τιμή των υψομέτρων να είναι στα 31.038 m και την ελάχιστη στα 1.415 m.

Τέλος, παρουσιάζεται η λύση που προέκυψε από φασματική τεχνική με τη χρήση του ολοκληρώματος του Stokes για σφαιρική προσέγγιση (βλ. εξίσωση 3.23a).



Πίνακας 4.13 Μοντέλο ΜΣΘ από πρόγνωση μέσω SPFOUR

Μοντέλο ΜΣΘ (SSH) (m) που προέκυψε από πρόγνωση μέσω SPFOUR Δεδομένα: N (EGM2008) + SLA (CRYOSAT-2)				
Mean	Min	Max	RMS	Std
15.778	1.587	31.054	17.194	2.090

Πίνακας 4.14 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου ΜΣΘ από πρόγνωση μέσω SPFOUR

Η λύση της σφαιρικής προσέγγισης παρουσιάζει μέση τιμή στα 15.778 m με την τυπική απόκλιση να βρίσκεται στα 2.09 m. Η ελάχιστη τιμή, όπως και στις προηγούμενες λύσεις βρίσκεται κοντά στα 1.483 m και η μέγιστη τιμή στα 31.054.

4.3. Συγκρίσεις Μοντέλων Μέσης Στάθμης Θάλασσας

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι συγκρίσεις μεταξύ των μοντέλων Μέσης Στάθμης Θάλασσας, όπως αυτά υπολογίστηκαν από τα δεδομένα της αποστολής CRYOSAT-2, με τις διάφορες μεθόδους πρόγνωσης. Τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι: MATLAB και GRAVSOFT. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα EMPCOV, COVFIT, GEOCOL, GEOFOUR και SPFOUR του GRAVOFT. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα harmonic_synth (Pavlis et al. 2008), το οποίο υπολογίζει τη συνεισφορά του γεωειδούς με τη χρήση σφαιρικών αρμονικών συναρτήσεων

Οι συγκρίσεις που παρουσιάζονται παρακάτω περιλαμβάνουν όλους τους συνδυασμούς μεταξύ των μοντέλων και αποτελούν ένα μέτρο της εσωτερικής ακρίβειας των προσεγγίσεων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των διαφορών των μοντέλων ΜΣΘ.

Συγκρίσεις μοντέλων ΜΣΘ της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2 με διαφορετικές μεθόδους πρόγνωσης					
(m)	Mean	Min	Max	RMS	Std
Linear – Cubic	-0.001	-1.148	0.196	0.026	± 0.012
Linear – NN	0.002	-0.641	0.577	0.098	± 0.023
Cubic – NN	0.002	-0.647	0.966	0.096	± 0.024
LSC – Bilinear	0.049	-0.265	0.72	0.074	±0.014
LSC – Kriging	0.01	-0.19	0.374	0.053	±0.011
LSC – Linear	0.046	-0.401	0.756	0.114	±0.018
LSC – Cubic	0.046	-1.237	0.835	0.129	±0.021
LSC – NN	0.048	-0.561	0.844	0.155	±0.025
Linear-Kriging	-0.037	-0.559	0.302	0.091	± 0.017
Linear-Bilinear	0.003	-0.451	0.383	0.0805	± 0.015
Bilinear-Kriging	-0.04	-0.346	0.163	0.049	± 0.006
Bilinear-Cubic	-0.004	-1.252	0.491	0.097	± 0.019
Bilinear – NN	-0.001	-0.592	0.656	0.123	± 0.022
Kriging-Cubic	0.036	-1.264	0.599	0.106	± 0.021
Kriging – NN	0.038	-0.517	0.683	0.132	± 0.022
LSC-I/O	0.016	-0.08	0.108	0.031	±0.008
LSC-GEOFOUR	-0.014	-0.253	0.761	0.096	±0.031
LSC-SPFOUR	-0.014	-0.251	0.752	0.097	±0.032
I/O-Linear	0.03	-0.427	0.72	0.112	±0.02
I/O-Bilinear	0.033	-0.318	0.684	0.062	±0.011
I/O-Kriging	-0.006	-0.221	0.338	0.044	±0.008
I/O-Cubic	0.03	-1.301	0.799	0.128	±0.024
I/O-NN	0.032	-0.587	0.808	0.154	±0.025
I/O-GEOFOUR	-0.03	-0.196	0.758	0.1	±0.036

I/O-SPFOUR	-0.03	-0.193	0.751	0.102	±0.038
GEOFOUR-Bilinear	0.063	-0.801	0.779	0.139	±0.04
GEOFOUR-Linear	0.06	-0.791	0.815	0.17	±0.032
GEOFOUR-Kriging	0.024	-0.801	0.433	0.12	±0.037
GEOFOUR-Cubic	0.06	-1.419	0.895	0.182	±0.034
GEOFOUR-NN	0.062	-0.801	0.903	0.2	±0.032
GEOFOUR-SPFOUR	0	-0.025	0.012	0.009	±0.002
SPFOUR-Linear	0.06	-0.725	0.817	0.172	±0.033
SPFOUR-Bilinear	0.064	-0.765	0.781	0.141	±0.041
SPFOUR-Kriging	0.024	-0.735	0.435	0.121	±0.039
SPFOUR-Cubic	0.06	-1.423	0.897	0.183	±0.035
SPFOUR-NN	0.062	-0.795	0.905	0.201	±0.033

Πίνακας 4.15 Στατιστικά χαρακτηριστικά της εσωτερικής ακρίβειας των μοντέλων Μέσης Στάθμης Θάλασσας

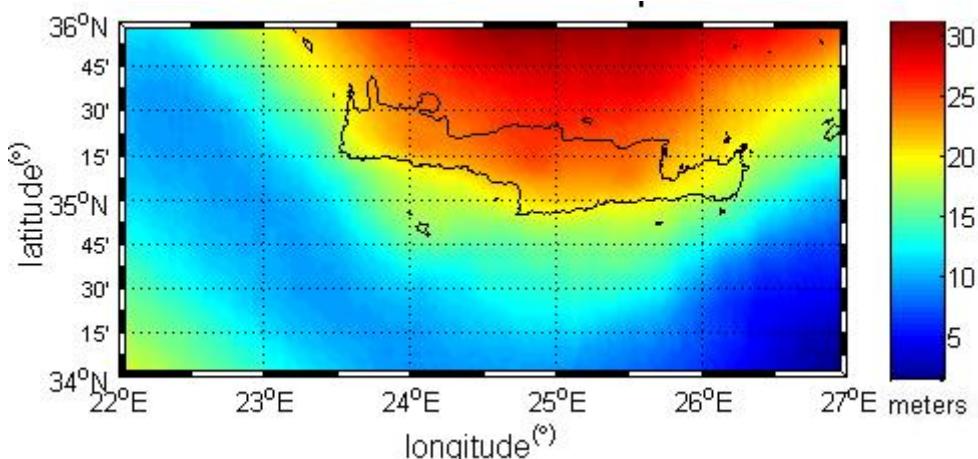
Στον παραπάνω πίνακα των στατιστικών χαρακτηριστικών των διαφορών των μοντέλων ΜΣΘ ως προς τη μέση τιμή τους δεν παρατηρούνται μεγάλες τιμές. Οι μικρότερες τιμές βρίσκονται κατά κύριο λόγο στις συγκρίσεις με το μοντέλο της διγραμμικής (bilinear) παρεμβολής, όπου οι τιμές σε πολλές περιπτώσεις φτάνουν την τάξη των μερικών χλιοστών, στις συγκρίσεις με το μοντέλο που προέκυψε από τη λύση του συστήματος εισόδου-εξόδου, καθώς και στη λύση LSC. Στις τιμές της τυπικής απόκλισης, επίσης, παρατηρούνται χαμηλές τιμές της τάξεως των 1-2 cm για τις συγκρίσεις μεταξύ όλων των μοντέλων. Η τυπική απόκλιση λαμβάνει τις χαμηλότερες τιμές κατά τη σύγκριση του μοντέλου LSC και του συστήματος εισόδου εξόδου. Επίσης, η σύγκριση μεταξύ των μοντέλων των φασματικών μεθόδων για επίπεδη και σφαιρική προσέγγιση παράγει πολύ κοντινά αποτελέσματα, όπως αναμενόταν, λόγω της περιορισμένης έκτασης της περιοχής μελέτης. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, εκτός από την περίπτωση Linear-Cubic, όπου βρίσκεται στα 2.5 cm, και στη περίπτωση LSC - I/O, όπου είναι 3 cm περίπου, κυμαίνεται σε χαμηλά σχετικά επίπεδα. Η μεγαλύτερη τιμή του παρουσιάζεται κατά τη σύγκριση SPFOUR-πλησιέστερου σημείου που λαμβάνει την τιμή 20.1 cm. Οι μικρότερες τιμές (min) των διαφορών των μοντέλων παρατηρούνται κατά τη σύγκριση SPFOUR-GEOFOUR, όπου τα δύο μοντέλα συμφωνούν σε πολύ μεγάλο βαθμό. Η μεγαλύτερη

διαφορά παρατηρείται μεταξύ των μοντέλων SPFOUR-cubic που βρίσκεται στο -1.42 m. Οι μεγαλύτερες τιμές των διαφορών κυμαίνονται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, με τη μέγιστη τιμή να παρατηρείται κατά τη σύγκριση Cubic-πλησιέστερου σημείου, και οι μικρότερες κατά κύριο λόγω να βρίσκονται στις συγκρίσεις με τη διγραμμική παρεμβολή.

4.4. Μοντέλα Γεωειδούς

Στο παρόν τμήμα της εργασίας παρουσιάζονται τα μοντέλα γεωειδούς που υπολογίσθηκαν με τη συνεισφορά του παγκόσμιου γεωδυναμικού μοντέλου EGM2008 για την περιοχή μελέτης, το οποίο υπολογίσθηκε για την περιοχή μελέτης με το πρόγραμμα harmonic_synth (Pavlis et al. 2008), και των δεδομένων SLA της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2 που προέκυψαν από τις προγνώσεις στο πλέγμα 2arcmin. Επίσης, κατά την επεξεργασία, αφαιρέθηκε από τα μοντέλα ΜΣΘ το μοντέλο δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας που χρησιμοποιήθηκε για της περιοχή μελέτης (Rio et al. 2007), επάνω στο προαναφερθέν πλέγμα, που προέκυψε με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής.

Η πρώτη περίπτωση που εξετάζεται περιλαμβάνει την πρόγνωση των SLA με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής για τον υπολογισμό του γεωειδούς και ακολουθεί παρακάτω:



Εικόνα 4.11 Μοντέλο γεωειδούς από πρόγνωση με τη μέθοδο γραμμικής παρεμβολής

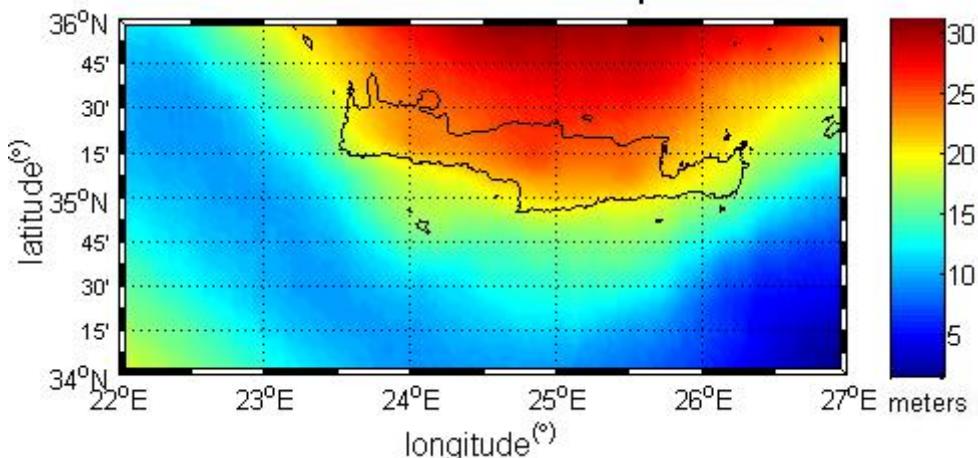
Παρατηρούμε ότι στις περιοχές βόρεια της Κρήτης τα υψόμετρα του γεωειδούς παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές τους. Διατρέχοντας την περιοχή νοτιότερα τα υψόμετρα παίρνουν μικρότερες τιμές και ιδιαίτερα στην περιοχή νοτιοανατολικά της Κρήτης όπου παρουσιάζεται ενδιαφέρον όπως θα φανεί και στις συγκρίσεις εξωτερικής ακρίβειας με ήδη υπάρχοντα μοντέλα.

Μοντέλο γεωειδούς (m) που προέκυψε από πρόγνωση με τη μέθοδο γραμμικής παρεμβολής				
Δεδομένα: N (EGM2008) + SLA (CRYOSAT-2) - MDT				
Mean	Min	Max	RMS	Std
15.799	1.520	31.082	17.230	± 2.104

Πίνακας 4.16 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου γεωειδούς από πρόγνωση με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής

Στην περίπτωση της προσέγγισης του γεωειδούς με το γραμμικό μοντέλο πρόγνωσης, η μέση τιμή βρίσκεται στα 15.799 m και η τυπική απόκλιση στα ± 2.104 m. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι 17.23 m και η ελάχιστη τιμή των υψομέτρων είναι 1.52 m. Η μέγιστη τιμή των δεδομένων είναι 31.082 m.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το μοντέλο του γεωειδούς που προέκυψε με τη μέθοδο της κυβικής παρεμβολής, καθώς επίσης και τα στατιστικά χαρακτηριστικά του.



Εικόνα 4.12 Μοντέλο γεωειδούς από πρόγνωση με τη μέθοδο κυβικής παρεμβολής

Μοντέλο γεωειδούς (m) που προέκυψε από πρόγνωση με τη μέθοδο κυβικής παρεμβολής

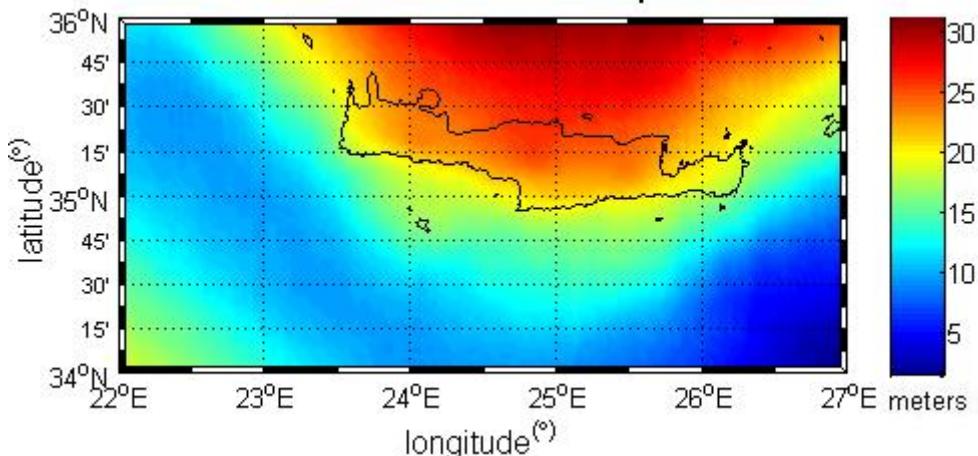
Δεδομένα: N (EGM2008) + SLA (CRYOSAT-2) - MDT

Mean	Min	Max	RMS	Std
15.799	1.520	31.083	17.231	± 2.104

Πίνακας 4.17 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου γεωειδούς από πρόγνωση με τη μέθοδο της κυβικής παρεμβολής

Στην περίπτωση της προσέγγισης του γεωειδούς με τη μέθοδο της κυβικής παρεμβολής, η μέση τιμή βρίσκεται στα 15.799 m και η τυπική απόκλιση στα ίδια επίπεδα με την προηγούμενη μέθοδο, στα ± 2.104 m. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι 17.231 m και η ελάχιστη τιμή των υψομέτρων είναι 1.52 m. Η μέγιστη τιμή των δεδομένων είναι 31.083 m.

Ακολούθως, δίνεται η γραφική αναπαράσταση και τα στατιστικά χαρακτηριστικά για την προσέγγιση του γεωειδούς με τη μέθοδο της διγραμμικής παρεμβολής



Εικόνα 4.13 Μοντέλο γεωειδούς από πρόγνωση με τη μέθοδο διγραμμικής παρεμβολής

Μοντέλο γεωειδούς (η) που προέκυψε από πρόγνωση με τη μέθοδο διγραμμικής παρεμβολής

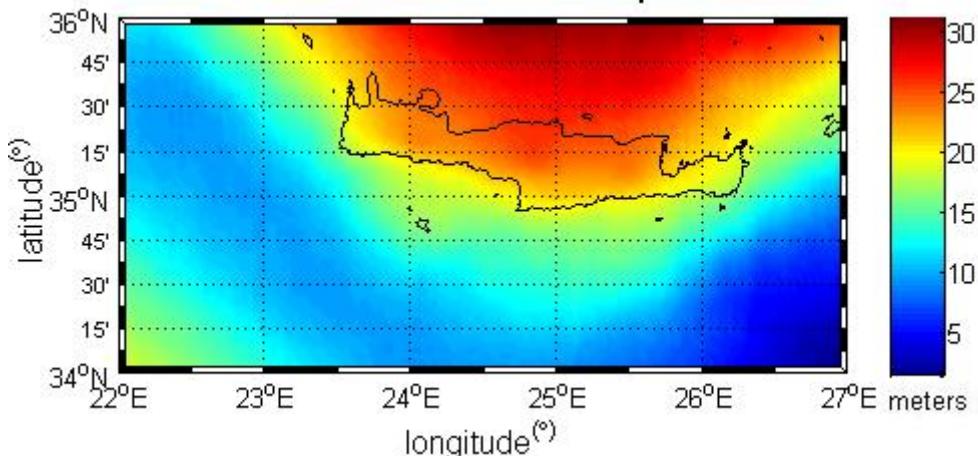
Δεδομένα: N (EGM2008) + SLA (CRYOSAT-2) - MDT

Mean	Min	Max	RMS	Std
15.795	1.418	31.030	17.227	± 2.105

Πίνακας 4.18 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου γεωειδούς από πρόγνωση με τη μέθοδο της διγραμμικής παρεμβολής

Στην περίπτωση της προσέγγισης του γεωειδούς με το μοντέλο πρόγνωσης της διγραμμικής παρεμβολής η μέση τιμή βρίσκεται στα 15.795 m και η τυπική απόκλιση στα ± 2.105 m. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι 17.227 m και η ελάχιστη τιμή των υψομέτρων είναι 1.418 m. Η μέγιστη τιμή των δεδομένων είναι 31.030 m.

Ακολούθως, παρουσιάζεται το μοντέλο γεωειδούς και τα στατιστικά χαρακτηριστικά που προέκυψε με τη μέθοδο LSC.



Εικόνα 4.14 Μοντέλο γεωειδούς από πρόγνωση με τη μέθοδο σημειακής προσαρμογής

Μοντέλο γεωειδούς (m) που προέκυψε από πρόγνωση με τη μέθοδο σημειακής προσαρμογής

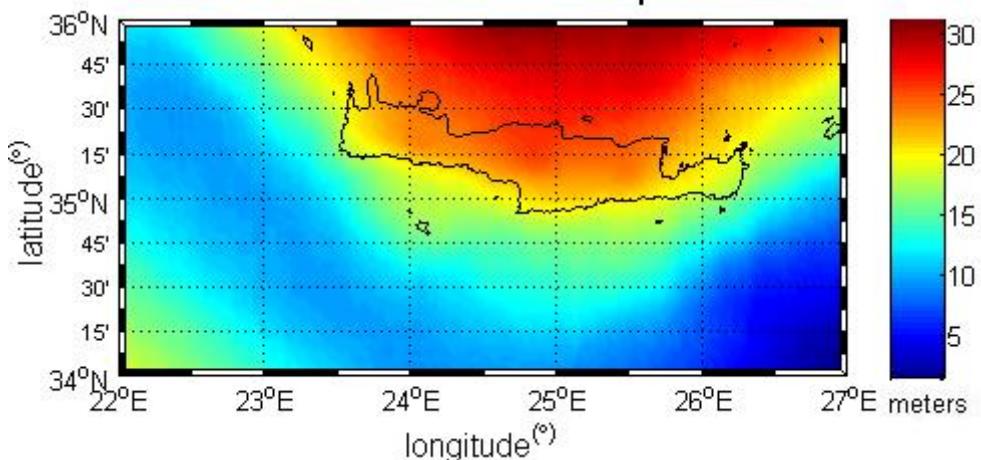
Δεδομένα: N (EGM2008) + SLA (CRYOSAT-2) - MDT

Mean	Min	Max	RMS	Std
15.853	1.499	31.068	17.278	± 2.106

Πίνακας 4.19 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου γεωειδούς από πρόγνωση με τη σημειακής προσαρμογής

Στην περίπτωση της προσέγγισης του γεωειδούς με το μοντέλο πρόγνωσης LSC, η μέση τιμή βρίσκεται στα 15.853 m και η τυπική απόκλιση στα ± 2.106 m. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι 17.12 m και η ελάχιστη τιμή των υψομέτρων είναι 1.499 m. Η μέγιστη τιμή των δεδομένων είναι 31.068 m.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το μοντέλο γεωειδούς που προέκυψε με τη μέθοδο kriging. Ακολουθούν η γραφική παράσταση και τα στατιστικά χαρακτηριστικά του μοντέλου.



Εικόνα 4.15 Μοντέλο γεωειδούς από πρόγνωση με τη μέθοδο Kriging

Μοντέλο γεωειδούς (m) που προέκυψε από πρόγνωση με τη μέθοδο Kriging

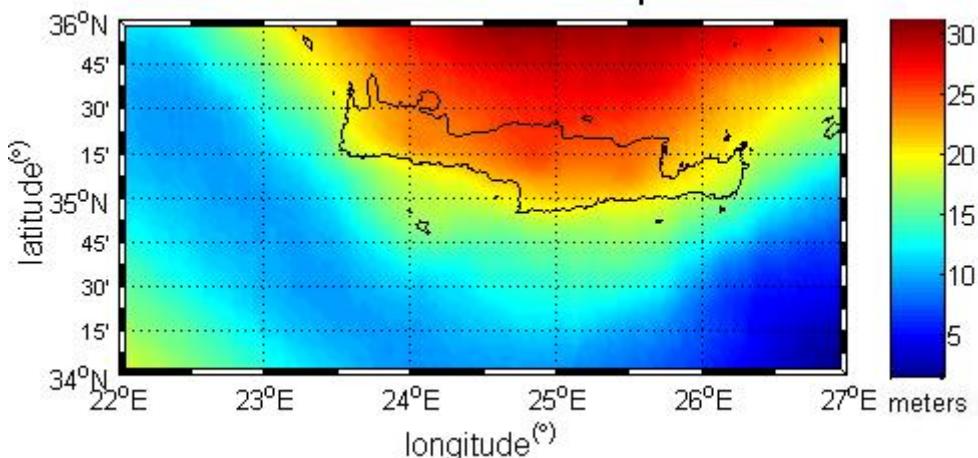
Δεδομένα: N (EGM2008) + SLA (CRYOSAT-2) - MDT

Mean	Min	Max	RMS	Std
15.835	1.494	31.081	17.262	± 2.101

Πίνακας 4.20 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου γεωειδούς από πρόγνωση με τη μέθοδο Kriging

Στην περίπτωση της προσέγγισης του γεωειδούς με το μοντέλο πρόγνωσης kriging, η μέση τιμή βρίσκεται στα 15.835 m και η τυπική απόκλιση στα ± 2.101 m. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι 17.262 m και η ελάχιστη τιμή των υψομέτρων είναι 1.494 m. Η μέγιστη τιμή των δεδομένων είναι 31.081 m.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το μοντέλο γεωειδούς για την περιοχή μελέτης, που προέκυψε με τη μέθοδο πλησιέστερου σημείου.



Εικόνα 4.16 Μοντέλο γεωειδούς από πρόγνωση με τη μέθοδο πλησιέστερου σημείου

Μοντέλο γεωειδούς (m) που προέκυψε από πρόγνωση με τη μέθοδο πλησιέστερου σημείου Δεδομένα: N (EGM2008) + SLA (CRYOSAT-2) - MDT

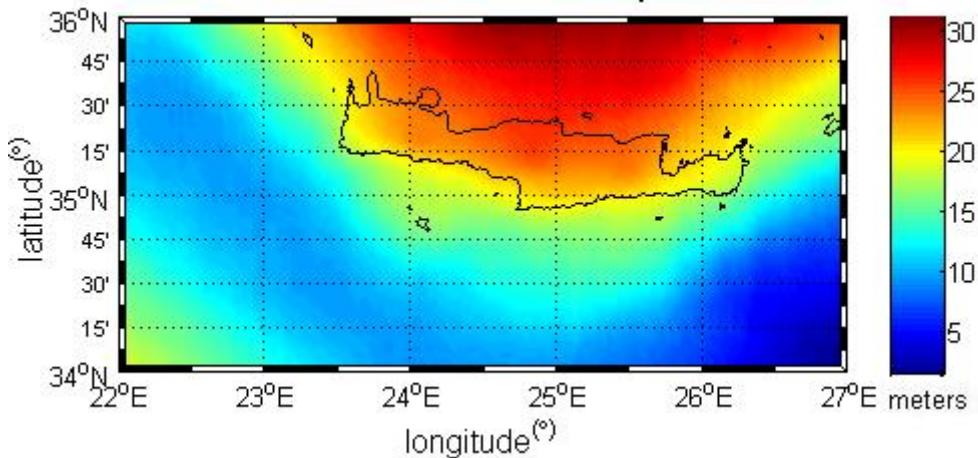
Mean	Min	Max	RMS	Std
15.797	1.280	31.177	17.228	± 2.106

Πίνακας 4.21 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου γεωειδούς από πρόγνωση με τη μέθοδο πλησιέστερου σημείου

Στην περίπτωση της προσέγγισης του γεωειδούς με το μοντέλο πρόγνωσης πλησιέστερου σημείου, η μέση τιμή βρίσκεται στα 15.797 m και η τυπική απόκλιση

στα ± 2.106 m. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι 17.228 m και η ελάχιστη τιμή των υψομέτρων είναι 1.28 m. Η μέγιστη τιμή των δεδομένων είναι 31.177 m.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το μοντέλο γεωειδούς που προέκυψε από τη λύση με το σύστημα εισόδου-εξόδου.



Πίνακας 4.22 Μοντέλο γεωειδούς από πρόγνωση με το σύστημα εισόδου-εξόδου

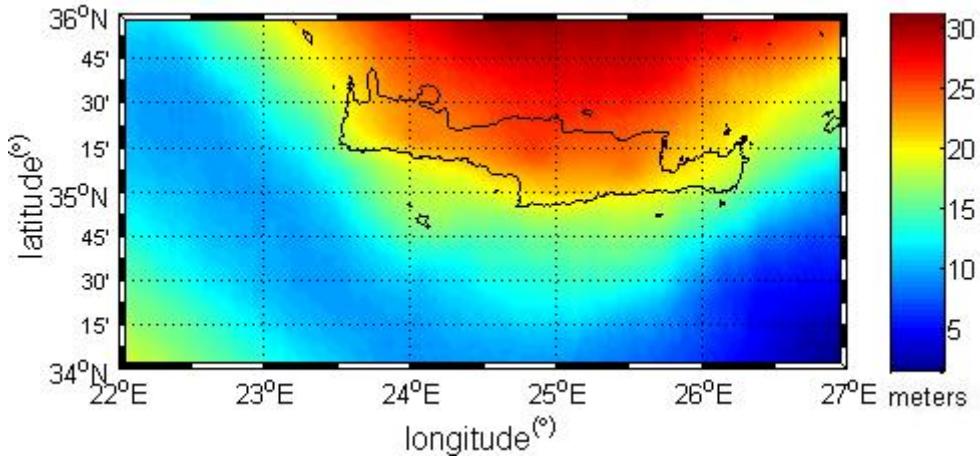
Μοντέλο γεωειδούς (η) που προέκυψε από πρόγνωση με τη μέθοδο του συστήματος εισόδου-εξόδου Δεδομένα: N (EGM2008) + SLA (CRYOSAT-2) - MDT

Mean	Min	Max	RMS	Std
15.837	1.469	31.046	17.265	± 2.103

Πίνακας 4.23 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου γεωειδούς από πρόγνωση με το σύστημα εισόδου-εξόδου

Παρατηρείται από τον παραπάνω πίνακα πως η μέση τιμή είναι 15.837 m, σε παραπλήσια επίπεδα με τις προηγούμενες μεθόδους και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση στα ± 2.103 m. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα υπολογίσθηκε στα 17.265 m με τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές του υπολογισθέντος μοντέλου στα 1.499 και 31.046 μέτρα αντίστοιχα.

Εν συνεχεία παρουσιάζονται δύο μοντέλα τα οποία προέκυψαν από φασματικές τεχνικές με τη χρήση του ολοκληρώματος του Stokes, για επίπεδη και σφαιρική προσέγγιση αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί αυτοί έγιναν με τα προγράμματα GEOFOUR και SPFOUR του λογισμικού GRAVSOFT.

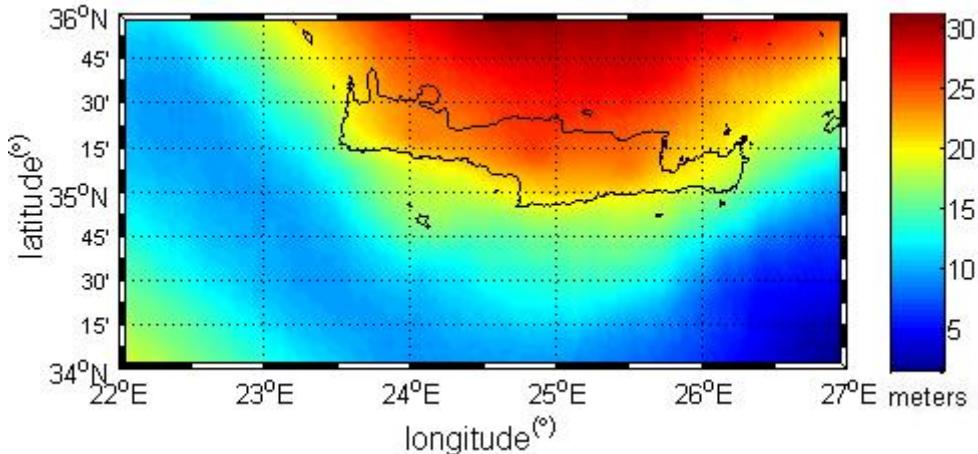


Πίνακας 4.24 Μοντέλο γεωειδούς από πρόγνωση με το GEOFOUR (επίπεδη προσέγγιση)

Μοντέλο γεωειδούς (m) που προέκυψε από πρόγνωση μέσω GEOFOUR Δεδομένα: N (EGM2008) + SLA (CRYOSAT-2) - MDT				
Mean	Min	Max	RMS	Std
15.867	1.426	31.083	17.274	± 2.093

Πίνακας 4.25 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου γεωειδούς από πρόγνωση με το GEOFOUR (επίπεδη προσέγγιση)

Στην περίπτωση της προσέγγισης του γεωειδούς με το μοντέλο που προέκυψε από φασματική τεχνική με τη χρήση του ολοκληρώματος Stokes για επίπεδη προσέγγιση, η μέση τιμή βρίσκεται στα 15.867 m και η τυπική απόκλιση στα ± 2.093 m. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι 17.274 m και η ελάχιστη τιμή των υψομέτρων είναι 1.426 m. Η μέγιστη τιμή των δεδομένων είναι 31.083 m.



Πίνακας 4.26 Μοντέλο γεωειδούς από πρόγνωση με το SPFOUR (σφαιρική προσέγγιση)

**Μοντέλο γεωειδούς (m) που προέκυψε από πρόγνωση μέσω SPFOUR Δεδομένα: N
(EGM2008) + SLA (CRYOSAT-2) - MDT**

Mean	Min	Max	RMS	Std
15.867	1.587	31.099	17.274	± 2.09

Πίνακας 4.27 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου γεωειδούς από πρόγνωση με το SPFOUR (σφαιρική προσέγγιση)

Στην περίπτωση της προσέγγισης του γεωειδούς με το μοντέλο που προέκυψε από φασματική τεχνική με τη χρήση του ολοκληρώματος Stokes για σφαιρική προσέγγιση, η μέση τιμή βρίσκεται στα 15.867 m και η τυπική απόκλιση στα ± 2.09 m. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι 17.274 m και η ελάχιστη τιμή των υψομέτρων είναι 1.587 m. Η μέγιστη τιμή των δεδομένων είναι 31.099 m.

4.5. Συγκρίσεις Μοντέλων Γεωειδούς

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι συγκρίσεις μεταξύ των μοντέλων γεωειδούς, όπως αυτά υπολογίστηκαν από τα δεδομένα της αποστολής CRYOSAT-2, με τις διάφορες μεθόδους πρόγνωσης.

Οι συγκρίσεις που παρουσιάζονται παρακάτω περιλαμβάνουν όλους τους συνδυασμούς μεταξύ των μοντέλων και αποτελούν ένα μέτρο της εσωτερικής

ακρίβειας των προσεγγίσεων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των διαφορών των μοντέλων γεωειδούς.

Συγκρίσεις μοντέλων Γεωειδούς της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2 με διαφορετικές μεθόδους πρόγνωσης					
(m)	Mean	Min	Max	RMS	Std
Linear – Cubic	-0.001	-1.149	0.196	0.026	± 0.012
Linear – NN	-0.002	-0.640	0.582	0.098	± 0.023
Cubic – NN	0.002	-0.646	0.964	0.096	± 0.024
LSC – Bilinear	0.058	-0.271	0.719	0.073	± 0.012
LSC – Kriging	0.018	-0.187	0.373	0.052	± 0.009
LSC – Linear	0.054	-0.401	0.756	0.113	± 0.019
LSC – Cubic	0.054	-1.238	0.835	0.128	± 0.022
LSC – NN	0.056	-0.566	0.84	0.154	± 0.026
Linear-Kriging	-0.036	-0.548	0.299	0.091	± 0.017
Linear-Bilinear	0.003	-0.440	0.382	0.080	± 0.015
Bilinear-Kriging	-0.04	-0.346	0.163	0.049	± 0.006
Bilinear-Cubic	-0.004	-1.261	0.479	0.097	± 0.019
Bilinear – NN	-0.001	-0.599	0.661	0.123	± 0.022
Kriging-Cubic	0.036	-1.2735	0.588	0.105	± 0.021
Kriging – NN	0.038	-0.5198	0.688	0.132	± 0.022
LSC-I/O	0.016	-0.08	0.108	0.031	± 0.008
LSC-GEOFOUR	-0.014	-0.253	0.761	0.096	± 0.031
LSC-SPFOUR	-0.014	-0.251	0.752	0.097	± 0.032
I/O-Linear	0.038	-0.427	0.72	0.112	± 0.021
I/O-bilinear	0.042	-0.315	0.683	0.062	± 0.012
I/O-kriging	0.002	-0.234	0.337	0.044	± 0.008
I/O-cubic	0.038	-1.301	0.8	0.127	± 0.024
I/O-NN	0.04	-0.592	0.804	0.154	± 0.026
I/O-GEOFOUR	-0.03	-0.196	0.758	0.1	± 0.036

I/O-SPFOUR	-0.03	-0.193	0.751	0.102	± 0.038
GEOFOUR-bilinear	0.072	-0.698	0.778	0.128	± 0.03
GEOFOUR-Linear	0.068	-0.698	0.815	0.162	± 0.028
GEOFOUR-Kriging	0.032	-0.698	0.432	0.106	± 0.027
GEOFOUR-Cubic	0.068	-1.419	0.895	0.174	± 0.03
GEOFOUR-NN	0.07	-0.698	0.9	0.193	± 0.03
GEOFOUR-SPFOUR	0	-0.025	0.012	0.009	± 0.024
SPFOUR-Linear	0.069	-0.692	0.817	0.163	± 0.028
SPFOUR-bilinear	0.072	-0.692	0.78	0.129	± 0.031
SPFOUR-Kriging	0.032	-0.692	0.434	0.107	± 0.029
SPFOUR-Cubic	0.068	-1.423	0.897	0.175	± 0.031
SPFOUR-NN	0.071	-0.692	0.902	0.194	± 0.03

Πίνακας 4.28 Στατιστικά χαρακτηριστικά της εσωτερικής ακρίβειας των μοντέλων γεωειδούς

Στον πίνακα 4.28 των στατιστικών χαρακτηριστικών των διαφορών των μοντέλων γεωειδούς ως προς τη μέση τιμή τους δεν παρατηρούνται μεγάλες τιμές. Οι μέγιστες τιμές των μέσων τιμών των συγκρίσεων φτάνουν τα 7 cm. Οι χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται κατά τις συγκρίσεις με τα μοντέλα LSC και συστημάτων εισόδου-εξόδου. Σχεδόν μηδενική τιμή παρατηρείται κατά τη σύγκριση του γραμμικού μοντέλου με το κυβικό και την παρεμβολή πλησιέστερου σημείου. Στις τιμές της τυπικής απόκλισης, επίσης, παρατηρούνται χαμηλές τιμές της τάξεως των μερικών cm για τις συγκρίσεις μεταξύ όλων των μοντέλων. Σχεδόν, μηδενικές τιμές παρατηρούνται κατά τη σύγκριση του μοντέλου kriging με το μοντέλο LSC, αλλά και με αυτό της διγραμμικής παρεμβολής. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα παρουσιάζει χαμηλές τιμές για τα μοντέλα LSC και των λύσεων του συστήματος εισόδου-εξόδου. Επίσης, τα στατιστικά των συγκρίσεων μεταξύ επίπεδης και σφαιρικής προσέγγισης των φασματικών λύσεων με το ολοκλήρωμα του Stokes παρουσιάζουν πολύ μεγάλη συμφωνία με τη μέση τιμή των διαφορών τους να είναι μηδενική. Οι μικρότερες τιμές των διαφορών των μοντέλων παρατηρούνται κατά κύριο λόγω στην μέθοδο LSC με τιμές κάτω του μισού μέτρου. Η μεγαλύτερη διαφορά παρατηρείται μεταξύ των μοντέλων SPFOUR-cubic που βρίσκεται στο -1.423 m. Οι μεγαλύτερες τιμές των

διαφορών κυμαίνονται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, με τη μέγιστη τιμή να παρατηρείται κατά τη σύγκριση Cubic-πλησιέστερου σημείου στα 96 cm.

Παρακάτω ακολουθεί ο πίνακας των στατιστικών στοιχείων του μοντέλου δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των μοντέλων γεωειδούς.

Μοντέλο Δυναμικής Θαλάσσιας Τοπογραφίας (Rio et al. 2007)				
Mean	Min	Max	RMS	Std
-0.089	-0.153	-0.002	0.093	0.028

Πίνακας 4.29 Στατιστικά χαρακτηριστικά μοντέλου Μέσης Δυναμικής Θαλάσσιας Τοπογραφίας (Rio)

Η μέση τιμή των δεδομένων δυναμικής θαλάσσιας τοπογραφίας είναι -8.9 cm, με την τυπική απόκλιση να βρίσκεται στα 2.8 cm. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι στα 9.3 cm με την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή των δεδομένων στα -15.3 cm και -0.2 cm. Τα δεδομένα αυτά αντιστοιχούν στο πλέγμα των 9211 στοιχείων που δημιουργήθηκε.

4.6. Προσδιορισμός εξωτερικής ακρίβειας των μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT-2

Στο παρόν κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται εκτενώς οι συγκρίσεις των μοντέλων γεωειδούς που υπολογίσθηκαν στην παρούσα εργασία με ένα προγενέστερο μοντέλο γεωειδούς για την ευρύτερη περιοχή της Κρήτης που είναι μια λύση συνδυασμού δεδομένων βαρύτητας και δορυφορικής αλτιμετρίας (Tziavos et al. 2013, Mertikas et al. 2013). Το προγενέστερο μοντέλο έχει προκύψει από τις ακόλουθες πηγές δεδομένων: (α) Δεδομένα βαρύτητας ανωμαλιών ελεύθερου αέρα (η βάση βαρύτητας για την ευρύτερη περιοχή της Κρήτης και της Γαύδου που αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια της εργασίας) και σχολιάζεται από τους Tziavos et al. (2013).

(β) Δεδομένα δορυφορικής αλτιμετρίας (υψόμετρα της επιφάνειας της θάλασσας και δεδομένα βαρύτητας που προέκυψαν από την αντιστροφή των δεδομένων

αλτιμετρίας) από το παγκόσμιο μοντέλο υψομέτρων θαλάσσιας στάθμης DTU10 (Andersen 2010). Το μοντέλο αλτιμετρίας περιλαμβάνει δεδομένα αλτιμετρίας των αποστολών ERS1/2, TOPEX/POSEIDON, JASON1/2 και ορισμένους πρώτους κύκλους της αποστολής CRYOSAT-2, που χρησιμοποιήθηκαν μόνον για το ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης όπου τα δεδομένα βαρύτητας δεν είχαν επαρκή χωρική ανάλυση.

(γ) Το γεωδυναμικό μοντέλο EGM2008 που ήταν επιφάνεια αναφοράς των δεδομένων των δύο προηγούμενων πηγών και χρησιμοποιήθηκε έως το βαθμό και τάξη ανάπτυξης 1834 (Tziavos et al. 2013, Mertikas et al. 2013).

(δ) Ένα μοντέλο τοπογραφίας-βαθυμετρίας για τις αναγωγές βαρύτητας.

Στην υπολογιστική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε η τεχνική Απομάκρυνσης-Υπολογισμού-Επαναφοράς (Remove-Compute-Restore/RCR) με επιφάνεια αναφοράς, όπως προαναφέρθηκε, το EGM2008.

Στο στάδιο του υπολογισμού χρησιμοποιήθηκε μια βάση ανηγμένων τιμών βαρύτητας σε πλέγμα 2arcmin και υπολογίσθηκαν υπόλοιπα υψομέτρων γεωειδούς με την τεχνική FFT, όπως σχολιάσθηκε στις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου 4. Εκτός της λύσης συνδυασμού (βαρύτητα και αλτιμετρία), υπολογίσθηκε και μία αμιγώς βαρυτημετρική λύση μόνον από τα δεδομένα βαρύτητας.

Στα δεδομένα βαρύτητας έγιναν τοπογραφικές διορθώσεις με τη μέθοδο της υπολειπόμενης τοπογραφίας (Residual Terrain Model Reduction – RTM). Οι αναγωγές RTM υπολογίσθηκαν από ένα μοντέλο τοπογραφίας-βαθυμετρίας για την ευρύτερη περιοχή χωρικής ανάλυσης 3 arcsec ($\sim 100m$).

Οι συγκρίσεις που παρατίθενται στο κεφάλαιο αυτό αποτελούν αξιολόγηση της εξωτερικής ακρίβειας των μοντέλων γεωειδούς που υπολογίσθηκαν στο πλαίσιο της

εργασίας αυτής και βασίστηκαν σε δεδομένα της αλτιμετρικής αποστολής CRYOSAT-2.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των μοντέλων που υπολογίσθηκαν με το διαθέσιμο γεωειδούς της Κρήτης που μόλις περιγράφηκε και οι γραφικές αναπαραστάσεις των συγκρίσεων αυτών. Ακολουθούν, επίσης, τα στατιστικά χαρακτηριστικά των υπολογισθέντων διαφορών.

Συγκρίσεις με το μοντέλο γεωειδούς (λύση συνδυασμού) της Κρήτης (Tziavos et al. 2013)

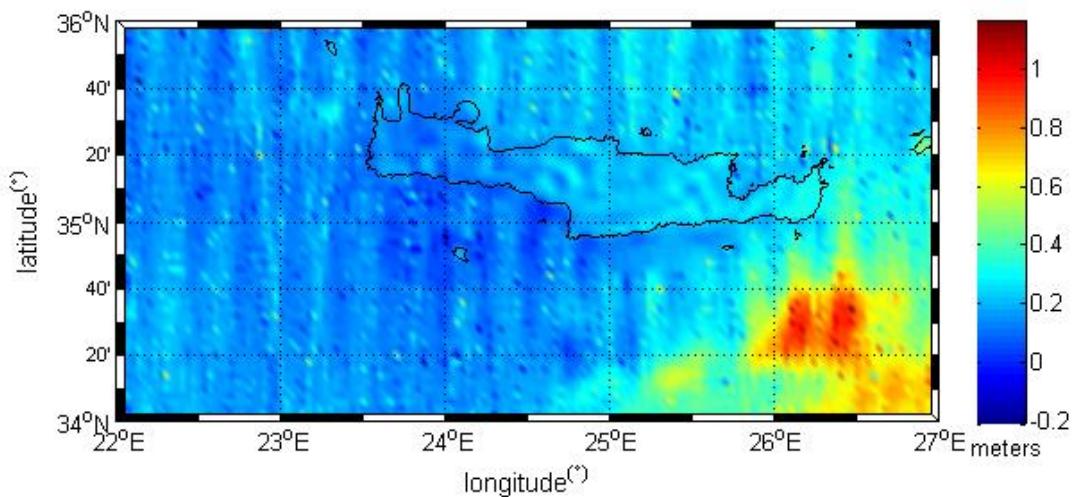
Στατιστικά χαρακτηριστικά (m) συγκρίσεων των μοντέλων του CRYOSAT-2 με το γεωειδές της Κρήτης					
$N_{Crete} - N_{Model}$	Mean	Min	Max	RMS	Std
Linear	0.226	-0.319	1.209	0.293	0.059
Bilinear	0.229	-0.211	1.162	0.278	0.063
Cubic	0.225	-1.314	1.239	0.299	0.059
NN	0.228	-0.495	1.287	0.313	0.056
Kriging	0.189	-0.137	1.009	0.245	0.058
LSC	0.260	0.030	0.989	0.300	0.063
SPFOUR	0.243	0.019	0.855	0.289	0.054
GEOFOUR	0.243	0.019	0.861	0.289	0.056
I/O Comb.	0.274	0.072	0.980	0.311	0.062

Πίνακας 4.30 Στατιστικά χαρακτηριστικά συγκρίσεων του μοντέλου της Κρήτης με τις διάφορες προσεγγίσεις του CRYOSAT-2

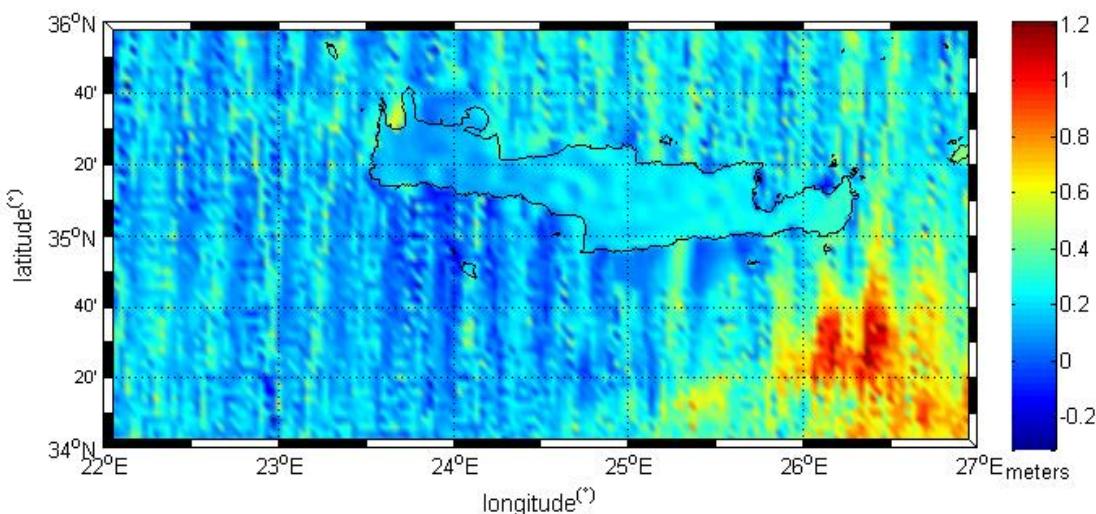
Όπως φαίνεται στον πίνακα 4.30, οι μέσες τιμές των διαφορών μεταξύ των έξι μοντέλων και του γεωειδούς της Κρήτης βρίσκονται στα 22.5 cm περίπου. Η μικρότερη τιμή παρουσιάζεται κατά τη σύγκριση του μοντέλου που προέκυψε με τη μέθοδο kriging, μέσω του προγράμματος GEOGRID του λογισμικού GRAVSOFT, και βρίσκεται 18.9 cm, ενώ η μεγαλύτερη απόκλιση παρουσιάζεται μεταξύ του μοντέλου συνδυασμού I/O και του γεωειδούς της Κρήτης, στα 27.4 cm. Οι τυπικές αποκλίσεις κυμαίνονται σε παραπλήσιες τιμές μεταξύ τους, από 5.6 cm έως 6.3 cm για την περίπτωση της διγραμμικής παρεμβολής. Παρόμοια, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή του για την περίπτωση της σύγκρισης με τη μέθοδο πλησιέστερου σημείου, στα 31.3 cm, ενώ η μικρότερη τιμή παρατηρείται

στα 24.5 cm για τη μέθοδο kriging. Η μεγαλύτερη τιμή των ελάχιστων διαφορών παρουσιάζεται στην μέθοδο της κυβικής παρεμβολής στα -1.314 m, ενώ η μικρότερη στις μεθόδους Stokes (GEOFOUR, SPFOUR) στα 1.9 εκατοστά. Οι μέγιστες τιμές των διαφορών πλησιάζουν και σε κάποιες περιπτώσεις ξεπερνούν το 1 m με τη μικρότερη τιμή στα 85.5 cm να παρουσιάζεται για τη μέθοδο SPFOUR.

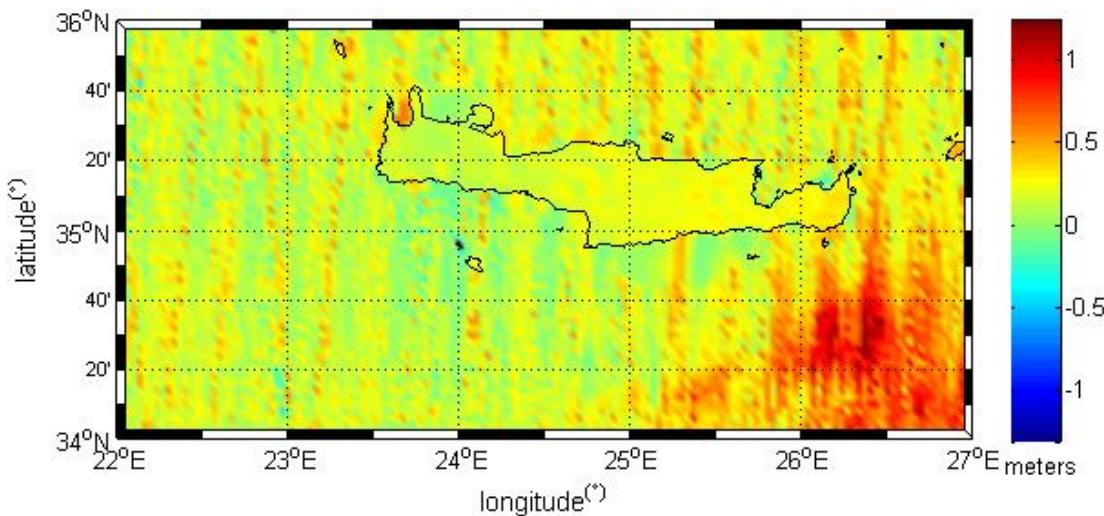
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι γραφικές παρατάσεις των συγκρίσεων των μεθόδων με το γεωειδές της Κρήτης.



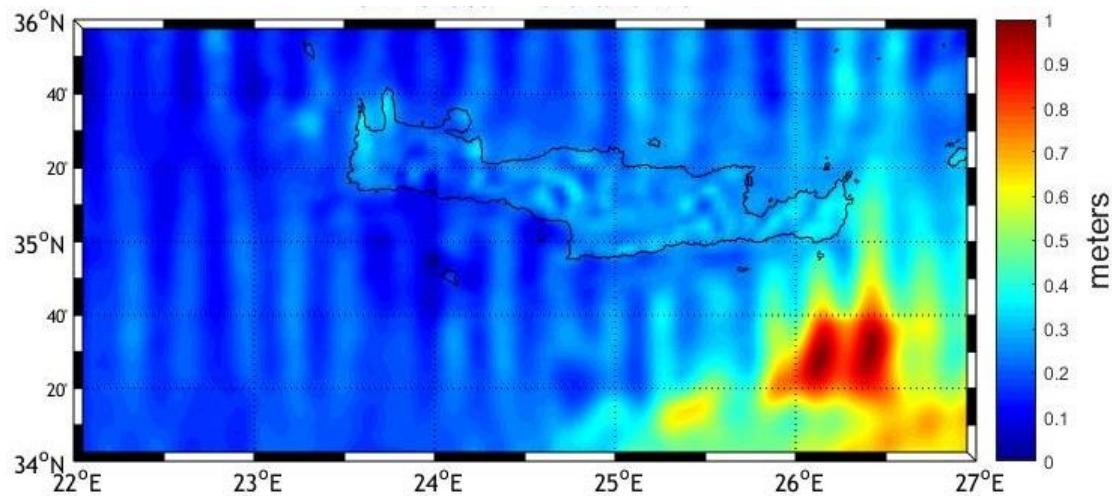
Εικόνα 4.17 Απεικόνιση της διαφοράς του γεωειδούς της Κρήτης με το μοντέλο διγραμμικής παρεμβολής της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2



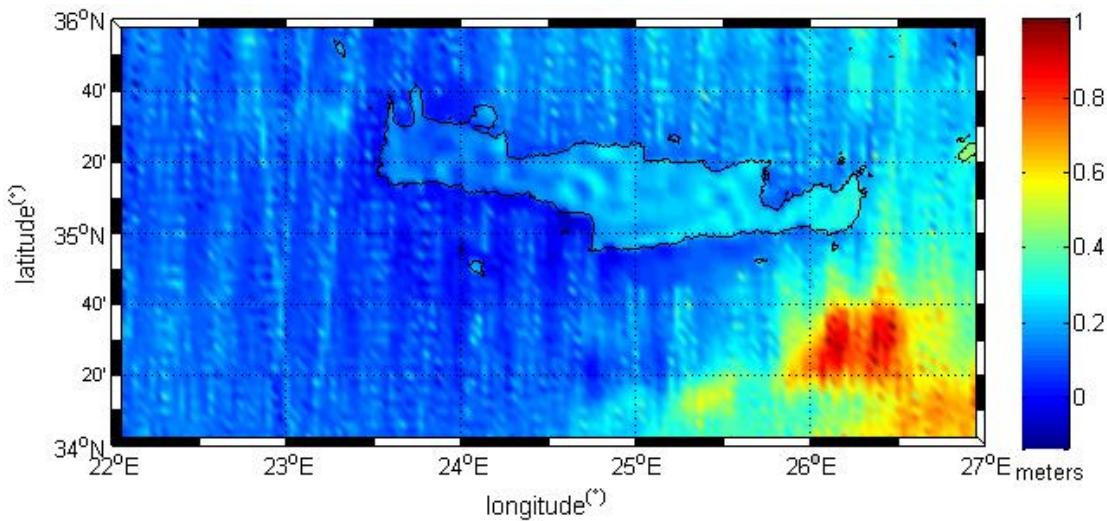
Εικόνα 4.18 Απεικόνιση της διαφοράς του γεωειδούς της Κρήτης με το μοντέλο γραμμικής παρεμβολής της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2



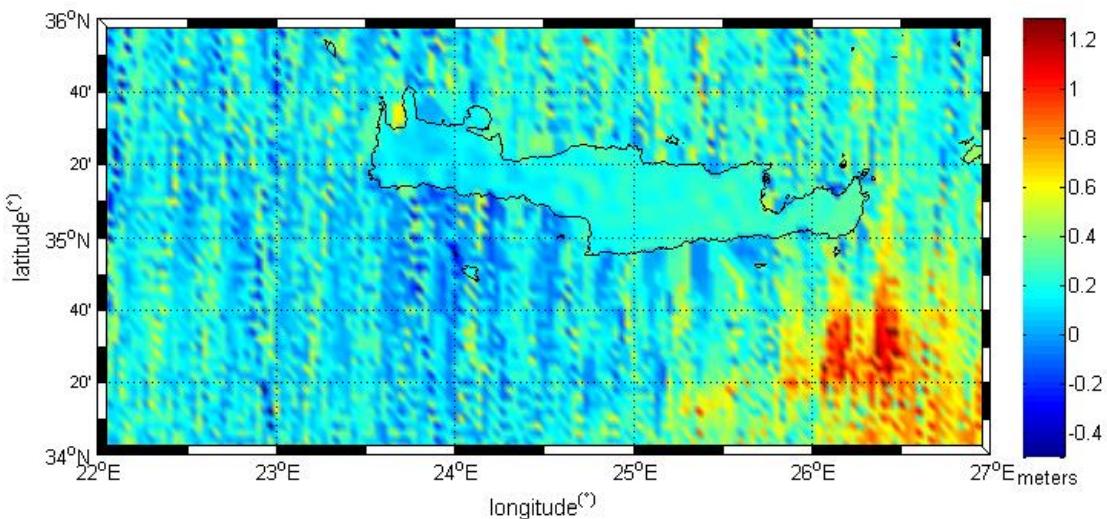
Εικόνα 4.19 Απεικόνιση της διαφοράς του γεωειδούς της Κρήτης με το μοντέλο κυβικής παρεμβολής της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2



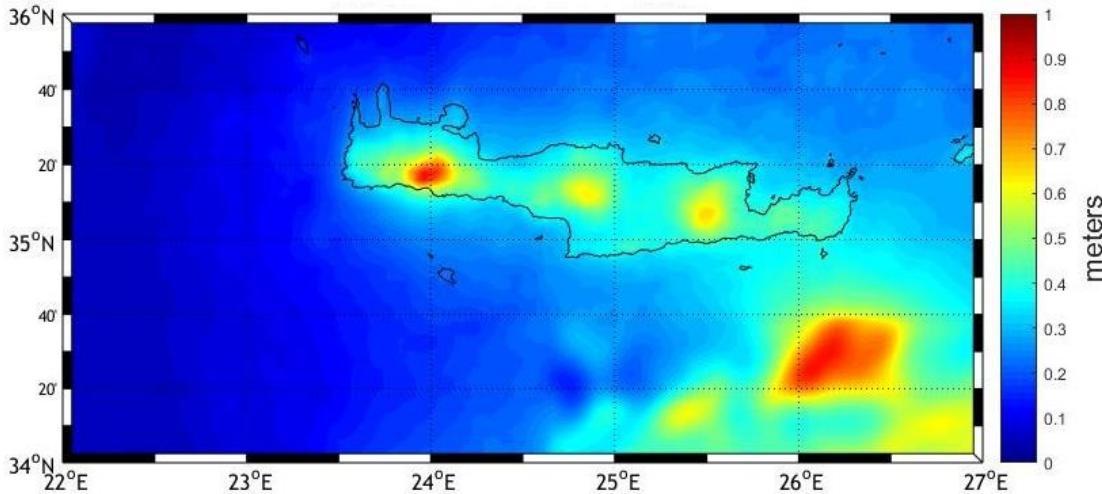
Εικόνα 4.20 Απεικόνιση της διαφοράς του γεωειδούς της Κρήτης με το μοντέλο σημειακής προσαρμογής της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2



Εικόνα 4.21 Απεικόνιση της διαφοράς του γεωειδούς της Κρήτης με το μοντέλο Kriging της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2



Εικόνα 4.22 Απεικόνιση της διαφοράς του γεωειδούς της Κρήτης με το μοντέλο πλησιέστερου σημείου της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2



Εικόνα 4.23 Απεικόνιση της διαφοράς του γεωειδούς της Κρήτης με το μοντέλο GEOFOUR της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2

Στην τελευταία αναπαράσταση παρατηρούνται μεγάλες διαφορές και στην ηπειρωτική περιοχή της Κρήτης κάτι το οποίο δεν φάνηκε στις υπόλοιπες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη μέθοδο αυτή, ως δεδομένα εισόδου δόθηκαν οι ανωμαλίες βαρύτητας της βάσης ανωμαλιών βαρύτητας της Κρήτης οι οποίες περιείχαν πληροφορία για την ηπειρωτική περιοχή σε αντίθεση με τα δεδομένα του CRYOSAT-2.

Όπως παρατηρείται από όλες τις γραφικές παραστάσεις των συγκρίσεων των μεθόδων με το γεωειδές της Κρήτης, στην νοτιοανατολική περιοχή του πλέγματος παρουσιάζονται οι μέγιστες διαφορές. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 4.30, οι μέγιστες τιμές οι οποίες ξεπερνούν το 1 m, εμφανίζονται σε όλες τις περιπτώσεις στην περιοχή $26^{\circ} \leq \lambda \leq 27^{\circ}$, $34^{\circ} \leq \varphi \leq 35^{\circ}$. Οι μεγάλες διαφορές οφείλονται στις ωκεανογραφικές και γεωλογικές ιδιαιτερότητες της περιοχής.

Συγκρίσεις λύσεων γεωειδούς κατά μήκος τροχιών των δορυφορικών αποστολών JASON-1, JASON-2 και SARAL

Σε αυτό το τμήμα της εργασίας παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των μοντέλων γεωειδούς της παρούσας εργασίας με δεδομένα του CRYOSAT-2 με τις δύο

προγενέστερες λύσεις που περιγράφηκαν προηγουμένως για την περιοχή μελέτης (τη λύση συνδυασμού βαρύτητας και αλτιμετρίας και τη βαρυτημετρική λύση). Οι συγκρίσεις πραγματοποιούνται κατά μήκος συγκεκριμένων δορυφορικών διαβάσεων των αλτιμετρικών αποστολών JASON-1, JASON-2 και SARAL, τα ίχνη των οποίων διέρχονται από το νησί της Γαύδου. Για τον λόγο αυτό, οι λύσεις του γεωειδούς κατά μήκος των δορυφορικών ιχνών χαρακτηρίζονται στη συνέχεια ως λύσεις γεωειδούς για τη Γαύδο. Οι συγκρίσεις αυτές αποτελούν ένα μέτρο αξιολόγησης της εξωτερικής ακρίβειας των μοντέλων.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως έχουμε διαθέσιμες από προηγούμενη μελέτη για την ευρύτερη περιοχή μια βαρυτημετρική λύση και μία λύση συνδυασμού (βαρύτητας και αλτιμετρίας).

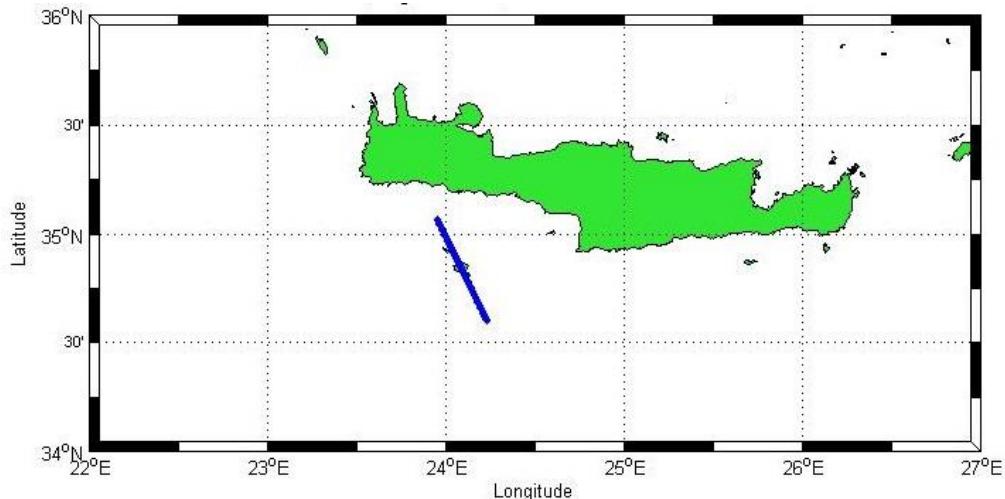
Με τη μέθοδο της σημειακής προσαρμογής (LSC) έγινε πρόγνωση υψομέτρων γεωειδούς όλων των διαθέσιμων προς σύγκριση λύσεων (των δύο προγενέστερων και των εννέα λύσεων της παρούσας μελέτης που χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα CRYOSAT-2) στα σημεία των τροχιακών ιχνών των δορυφόρων JASON-1, JASON-2 και SARAL.

Για την πρόγνωση του γεωειδούς κατά μήκος των δορυφορικών ιχνών των δορυφορικών αποστολών, χρησιμοποιήθηκε ένα παράθυρο δεδομένων από κάθε ένα από τα προς σύγκριση μοντέλα γεωειδούς στην περιοχή $23^\circ \leq \lambda \leq 25^\circ$, $34.5^\circ \leq \varphi \leq 35.5^\circ$. Από το παράθυρο αυτό έγινε πρόγνωση με LSC πάνω στις τροχιές των δορυφορικών αποστολών για τις συγκρίσεις των υψομέτρων του γεωειδούς.

Συγκρίσεις των εννέα λύσεων γεωειδούς του CRYOSAT-2 με τη βαρυτημετρική λύση κατά μήκος τροχιών του JASON-1

Παρουσιάζεται καταρχήν η σύγκριση της βαρυτημετρικής λύσης με τις εννέα λύσεις της παρούσας μελέτης κατά μήκος της δορυφορικής αποστολής JASON-1 για τον

κύκλο 100 και τη διάβαση 018. Περιλαμβάνονται 200 τιμές δεδομένων κατά μήκος της τροχιάς. Στην εικόνα 4.24 παρουσιάζεται το δορυφορικό ίχνος για την συγκεκριμένη αποστολή στην νότια περιοχή της Κρήτης.



Εικόνα 4.24 Τροχιά δορυφορικής αποστολής Jason - 1, κύκλος 100, διάβαση 018

Στον πίνακα 4.31 συνοψίζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκρίσεων των μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT-2 με την προγενέστερη βαρυτημετρική λύση για το γεωειδές στην περιοχή μελέτης.

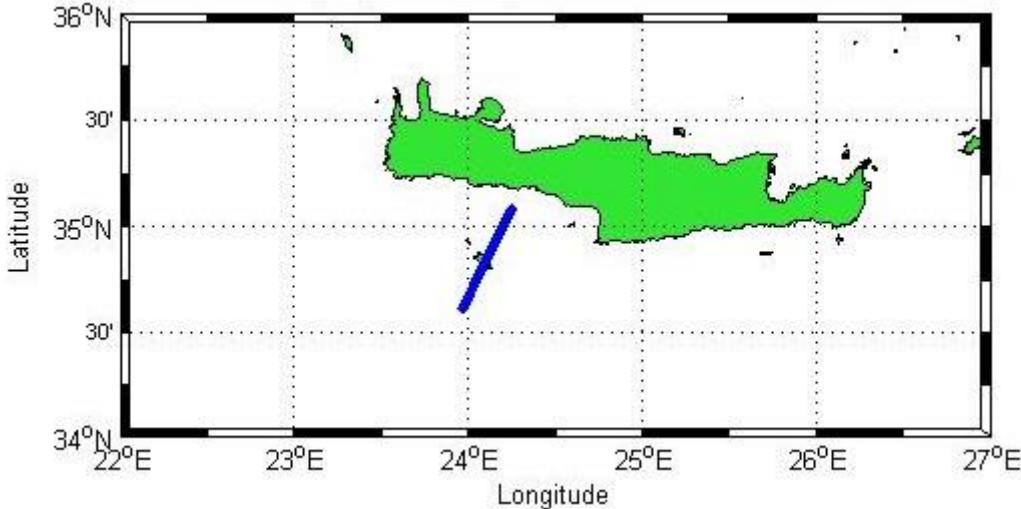
Στατιστικά χαρακτηριστικά (m) συγκρίσεων των μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT-2 με τη βαρυτημετρική λύση κατά μήκος τροχιών του JASON-1

$N_{Sat} - N_{Model}$	Mean	Min	Max	RMS	Std
Linear	-0.096	-0.228	0.123	0.133	0.093
Bilinear	-0.079	-0.126	0.002	0.086	0.034
Cubic	-0.093	-0.255	0.149	0.137	0.101
NN	-0.103	-0.079	0.125	0.157	0.119
Kriging	-0.115	-0.176	0.002	0.123	0.044
LSC	-0.04	-0.084	-0.003	0.046	0.023
I/O Comb	0	-0.037	0.021	0.015	0.015
GEOFOUR	0.035	-0.068	0.117	0.06	0.05
SPFOUR	0.037	-0.073	0.124	0.065	0.053

Πίνακας 4.31 Στατιστικά χαρακτηριστικά συγκρίσεων μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT-2 με τη βαρυτημετρική λύση (JASON - 1, κύκλος 100, διάβαση 018)

Όπως παρατηρούμε στον πίνακα 4.31 οι μέσες τιμές των διαφορών κυμαίνονται μεταξύ 0.01 cm και -11.5 cm, με τη μικρότερη τιμή να παρουσιάζεται κατά τη σύγκριση με το μοντέλο του συστήματος διπλής εισόδου/απλής εξόδου και τη μεγαλύτερη κατά τη σύγκριση με το μοντέλο kriging. Μικρή μέση τιμή, επίσης, παρουσιάζει η σύγκριση με το μοντέλο LSC στα 4 cm και με τις μεθόδους του Stokes στα 3.5 εκατοστά. Η τυπική απόκλιση παρουσιάζει μικρές τιμές για την μέθοδο της διγραμμικής παρεμβολής στα 3.4 cm και LSC στα 2.3, με τη μέγιστη τιμή στα 11.9 cm να παρατηρείται στη μέθοδο πλησιέστερου σημείου. Η ελάχιστη τιμή της τυπικής απόκλισης απαντάται στη μέθοδο του συστήματος εισόδου-εξόδου στα 1.5 εκατοστά. Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των διαφορών δεν παρουσιάζουν μεγάλες τιμές (14.9 cm και -25.5 cm αντίστοιχα) και δείχνουν ότι τα δύο μοντέλα συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό. Όσον αφορά τις μέγιστες τιμές των διαφορών, η μικρότερη συναντάται στη μέθοδο LSC στα - 0.3 εκατοστά.

Μία ακόμη σύγκριση των εννέα λύσεων του CRYOSAT-2 με τη βαρυτημετρική λύση έγινε κατά μήκος της τροχιάς του JASON-1 για τον κύκλο 100 και τη διάβαση 109. Περιλαμβάνονται 200 τιμές δεδομένων κατά μήκος της τροχιάς. Στην εικόνα 4.25 παρουσιάζεται το δορυφορικό ίχνος για την συγκεκριμένη αποστολή στην νότια περιοχή της Κρήτης που διέρχεται από τη Γαύδο.



Εικόνα 4.25 Τροχιά δορυφορικής αποστολής JASON-1, κύκλος 100, διάθαση 109

Στον πίνακα 4.32 παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκρίσεων των μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT-2 με τη βαρυτημετρική λύση κατά μήκος της τροχιάς του JASON-1.

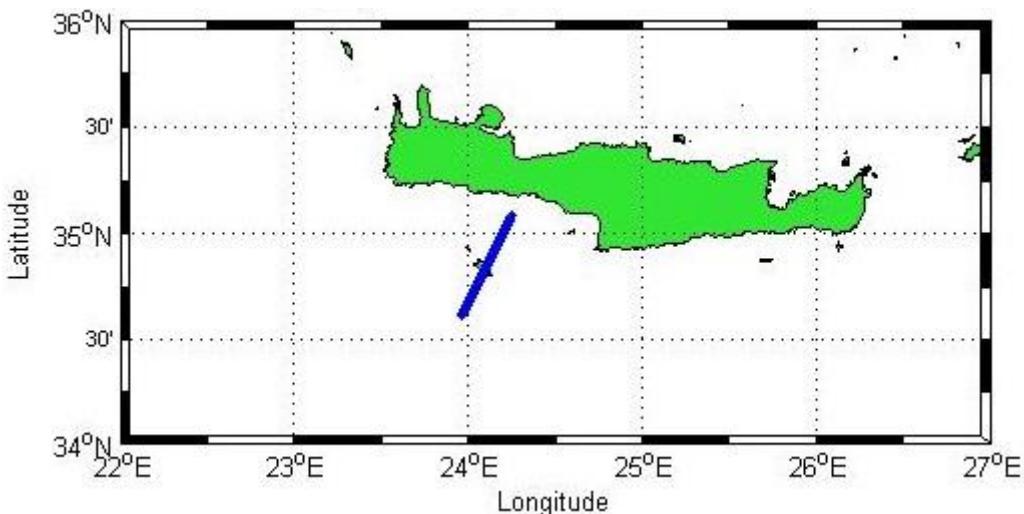
Στατιστικά χαρακτηριστικά (m) συγκρίσεων των μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT-2 με τη βαρυτημετρική λύση κατά μήκος τροχιών του JASON-1					
<i>N_{Sat} – N_{Model}</i>	Mean	Min	Max	RMS	Std
Linear	-0.089	-0.237	0.136	0.134	0.10
Bilinear	-0.084	-0.149	-0.008	0.09	0.034
Cubic	-0.085	-0.267	0.163	0.141	0.112
NN	-0.125	-0.322	0.205	0.177	0.126
Kriging	-0.126	-0.177	-0.012	0.132	0.04
LSC	-0.032	-0.073	0.01	0.04	0.025
I/O Comb	-0.004	-0.033	0.025	0.016	0.015
GEOFOUR	0.046	-0.026	0.112	0.057	0.034
SPFOUR	0.048	-0.031	0.12	0.061	0.038

Πίνακας 4.32 Στατιστικά χαρακτηριστικά συγκρίσεων μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT-2 με τη βαρυτημετρική λύση (JASON - 1, κύκλος 100, διάθαση 109)

Όπως παρατηρούμε στον πίνακα 4.32 οι μέσες τιμές των διαφορών κυμαίνονται μεταξύ -0.4 cm και -12.6 cm, με τη μικρότερη τιμή να παρουσιάζεται κατά τη σύγκριση με το μοντέλο εισόδου-εξόδου και τη μεγαλύτερη κατά τη σύγκριση με το μοντέλο kriging. Μικρή μέση τιμή, επίσης, παρουσιάζει η σύγκριση με το μοντέλο LSC. Η τυπική απόκλιση παρουσιάζει μικρές τιμές για την μέθοδο εισόδου-εξόδου στα 1.5 cm και LSC στα 2.5, με τη μέγιστη τιμή στα 12.6 cm να παρατηρείται στη

μέθοδο πλησιέστερου σημείου. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα κυμαίνεται από 1.6 cm για τη μέθοδο εισόδου-εξόδου έως και 17.7 για τη λύση πλησιέστερου σημείου. Η LSC παρουσιάζει μέσο τετραγωνικό σφάλμα στα 4 cm. Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των διαφορών δεν παρουσιάζουν μεγάλες τιμές. 20.5 cm και -32.2 cm αντίστοιχα, δείχνουν ότι τα διάφορα μοντέλα συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό.

Μια τελευταία σύγκριση κατά μήκος της τροχιάς του JASON-1 αφορά τον κύκλο 176 και τη διάβαση 109. Περιλαμβάνονται 200 τιμές δεδομένων κατά μήκος της τροχιάς. Στην εικόνα 4.26 παρουσιάζεται το δορυφορικό ίχνος για την συγκεκριμένη αποστολή στην νότια περιοχή της Κρήτης που διέρχεται από τη Γαύδο.



Εικόνα 4.26 Τροχιά δορυφορικής αποστολής JASON-1, κύκλος 176, διάβαση 109

Στον πίνακα 4.33 παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκρίσεων των μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT-2 με τη βαρυτημετρική λύση κατά μήκος της τροχιάς του JASON-1.

Στατιστικά χαρακτηριστικά (m) συγκρίσεων των μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT-2 με τη βαρυτημετρική λύση κατά μήκος τροχιών του JASON-1

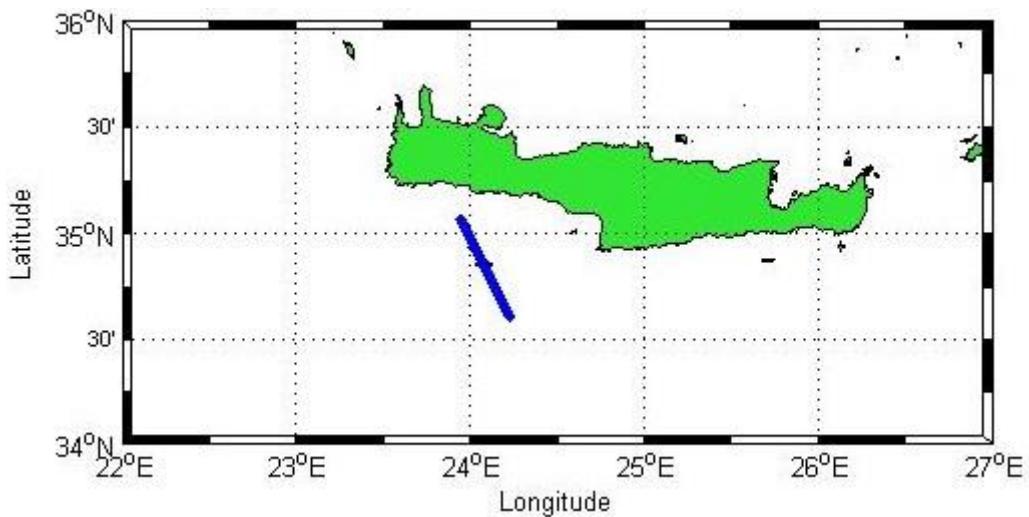
$N_{Sat} - N_{Model}$	Mean	Min	Max	RMS	Std
Linear	-0.09	-0.242	0.125	0.133	0.099
Bilinear	-0.083	-0.153	-0.005	0.09	0.035
Cubic	-0.087	-0.271	0.155	0.141	0.111
NN	-0.126	-0.319	0.202	0.123	0.123
Kriging	-0.125	-0.177	-0.01	0.132	0.042
LSC	-0.032	-0.077	0.012	0.041	0.026
I/O Comb	-0.004	-0.034	0.026	0.016	0.016
GEOFOUR	0.046	-0.028	0.113	0.057	0.034
SPFOUR	0.048	-0.033	0.12	0.061	0.038

Πίνακας 4.33 Στατιστικά χαρακτηριστικά συγκρίσεων μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT-2 με τη βαρυτημετρική λύση (JASON - 1, κύκλος 176, διάβαση 109)

Όπως φαίνεται στον πίνακα 4.33 οι μέσες τιμές των διαφορών κυμαίνονται μεταξύ -0.4 cm και -12.6 cm, με τη μικρότερη τιμή να παρουσιάζεται κατά τη σύγκριση με το μοντέλο εισόδου-εξόδου και τη μεγαλύτερη κατά τη σύγκριση με το μοντέλο του πλησιέστερου σημείου. Μικρή μέση τιμή, επίσης, παρουσιάζει η σύγκριση με το μοντέλο LSC στα -3.2 εκατοστά. Η τυπική απόκλιση παρουσιάζει μικρές τιμές για τη μέθοδο εισόδου-εξόδου στα 1.6 cm και για την LSC στα 2.6, με τη μέγιστη τιμή στα 12.3 cm να παρατηρείται στη μέθοδο πλησιέστερου σημείου. Η LSC παρουσιάζει μέσο τετραγωνικό σφάλμα στα 4.1 cm. Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των διαφορών δεν παρουσιάζουν μεγάλες τιμές και κυμαίνονται στα 20.2 cm και -31.9 cm αντίστοιχα.

Συγκρίσεις των εννέα λύσεων γεωειδούς του CRYOSAT-2 με τη βαρυτημετρική λύση και τη λύση συνδυασμού κατά μήκος τροχιών του JASON-2

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται καταρχήν τα στατιστικά αποτελέσματα της σύγκρισης των εννέα λύσεων που βασίζονται στα δεδομένα CRYOSAT-2 με τη λύση συνδυασμού κατά μήκος της τροχιάς της δορυφορικής αποστολής JASON-2 για τον κύκλο 174 και τη διάβαση 018. Περιλαμβάνονται 200 τιμές δεδομένων κατά μήκος της τροχιάς. Στην εικόνα 4.27 παρουσιάζεται το δορυφορικό ίχνος για την συγκεκριμένη αποστολή στην νότια περιοχή της Κρήτης, στο νησί της Γαύδου.



Εικόνα 4.27 Τροχιά δορυφορικής αποστολής JASON-2, κύκλος 174, διάθαση 018

Στον πίνακα 4.34 παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκρίσεων των μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT-2 με τη λύση συνδυασμού κατά μήκος της τροχιάς του JASON-2.

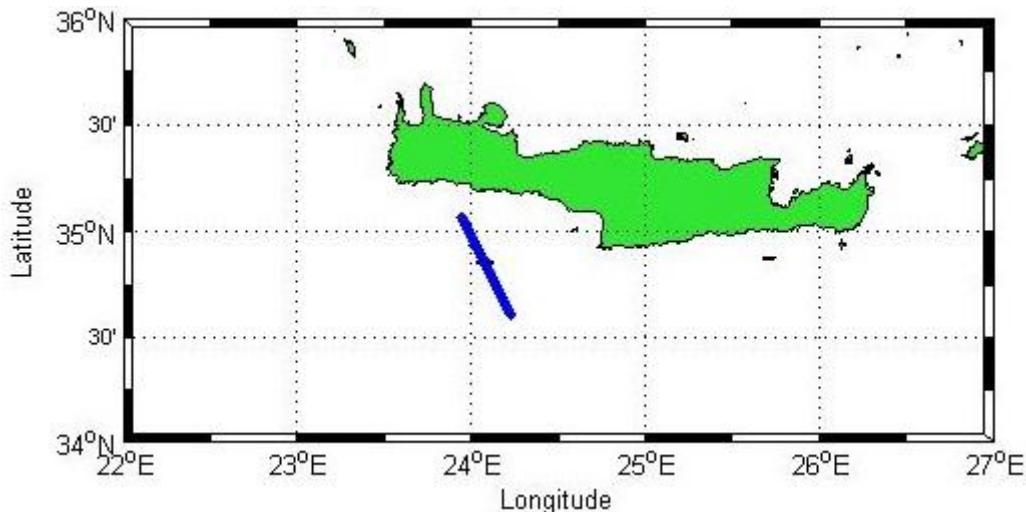
Στατιστικά χαρακτηριστικά (m) συγκρίσεων των μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT-2 με τη λύση συνδυασμού κατά μήκος τροχιών του JASON-2					
$N_{Sat} - N_{Model}$	Mean	Min	Max	RMS	Std
Linear	-0.080	-0.206	0.158	0.129	0.101
Bilinear	-0.064	-0.126	0.032	0.077	0.042
Cubic	-0.078	-0.291	0.187	0.137	0.112
NN	-0.088	-0.336	0.176	0.157	0.130
Kriging	-0.100	-0.177	0.032	0.113	0.052
LSC	-0.025	-0.064	0.02	0.037	0.027
I/O Comb	0.015	-0.022	0.045	0.022	0.017
GEOFOUR	0.05	-0.07	0.129	0.074	0.054
SPFOUR	0.052	-0.075	0.136	0.078	0.058

Πίνακας 4.34 Στατιστικά χαρακτηριστικά συγκρίσεων μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT- 2 με τη λύση συνδυασμού (JASON - 2, κύκλος 174, διάθαση 018)

Όπως φαίνεται στον πίνακα 4.34 οι μέσες τιμές των διαφορών κυμαίνονται μεταξύ 1.5 cm και -10.6 cm, με τη μικρότερη τιμή να παρουσιάζεται κατά τη σύγκριση με το μοντέλο εισόδου-εξόδου και τη μεγαλύτερη κατά τη σύγκριση με το μοντέλο kriging. Μικρή μέση τιμή, επίσης, παρουσιάζει η σύγκριση με το μοντέλο LSC στα -2.5

εκατοστά. Η τυπική απόκλιση παρουσιάζει μικρές τιμές για την μέθοδο εισόδου-εξόδου στα 1.7 cm και LSC στα 2.7, με τη μέγιστη τιμή στα 13 cm να παρατηρείται στη μέθοδο πλησιέστερου σημείου. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα κυμαίνεται από 2.2 cm για τη μέθοδο εισόδου-εξόδου έως και 15.7 για τη μέθοδο πλησιέστερου σημείου. Η LSC παρουσιάζει μέσο τετραγωνικό σφάλμα στα 3.7 cm. Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των διαφορών δεν παρουσιάζουν μεγάλες τιμές και βρίσκονται στα 18.7 cm και -33.6 cm αντίστοιχα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ανάλογα στατιστικά αποτελέσματα των εννέα λύσεων με τη βαρυτημετρική λύση κατά μήκος της δορυφορικής τροχιάς της αποστολής JASON-2 για τον κύκλο 174 και τη διάβαση 018. Περιλαμβάνονται 200 τιμές δεδομένων κατά μήκος της τροχιάς. Στην εικόνα 4.28 παρουσιάζεται το δορυφορικό ίχνος για την συγκεκριμένη αποστολή στην νότια περιοχή της Κρήτης.



Εικόνα 4.28 Τροχιά δορυφορικής αποστολής JASON-2, κύκλος 174, διάβαση 018

Στον πίνακα 4.35 παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκρίσεων των μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT-2 με τη βαρυτημετρική λύση κατά μήκος της τροχιάς του JASON-2.

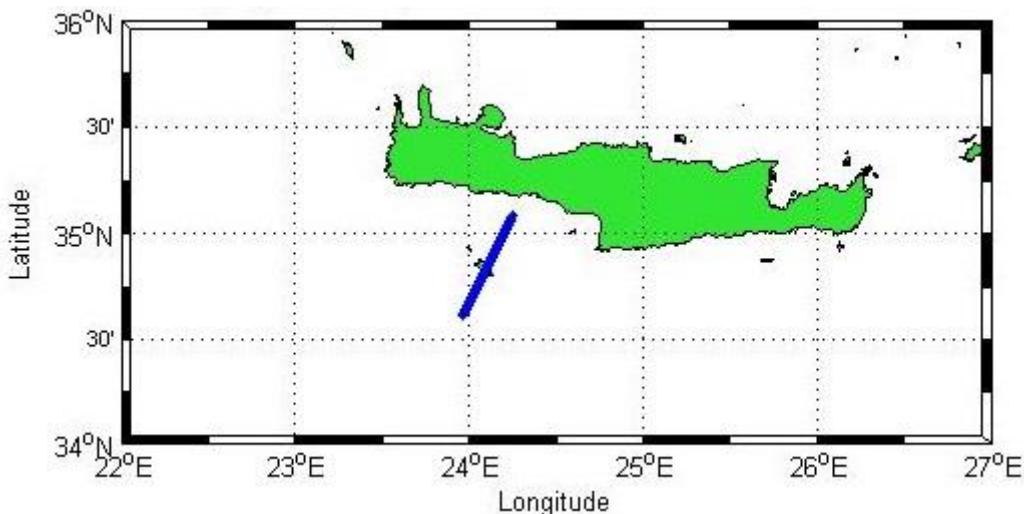
**Στατιστικά χαρακτηριστικά (m) συγκρίσεων των μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT-2
με τη βαρυτημετρική λύση κατά μήκος τροχιών του JASON-2**

$N_{Sat} - N_{Model}$	Mean	Min	Max	RMS	Std
Linear	-0.095	-0.235	0.134	0.136	0.097
Bilinear	-0.079	-0.128	0.004	0.086	0.034
Cubic	-0.094	-0.315	0.162	0.143	0.108
NN	-0.079	-0.341	0.152	0.162	0.126
Kriging	-0.115	-0.176	0.004	0.124	0.045
LSC	-0.04	-0.084	-0.003	0.047	0.024
I/O Comb	0	-0.036	0.021	0.015	0.015
GEOFOUR	0.035	-0.068	0.117	0.061	0.05
SPFOUR	0.037	-0.074	0.124	0.065	0.053

Πίνακας 4.35 Στατιστικά χαρακτηριστικά συγκρίσεων μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT-2 με τη βαρυτημετρική λύση (JASON - 2, κύκλος 174, διάβαση 018)

Όπως φαίνεται στον πίνακα 4.35 οι μέσες τιμές των διαφορών κυμαίνονται μεταξύ 0.01 cm και -11.5 cm, με τη μικρότερη τιμή να παρουσιάζεται κατά τη σύγκριση με το μοντέλο εισόδου-εξόδου και τη μεγαλύτερη κατά τη σύγκριση με το μοντέλο kriging. Μικρή μέση τιμή, επίσης, παρουσιάζει η σύγκριση με το μοντέλο που προέκυψε από τη φασματική μέθοδο με το ολοκλήρωμα του Stokes στα 3.5 εκατοστά. Η τυπική απόκλιση παρουσιάζει μικρές τιμές για την μέθοδο εισόδου-εξόδου στα 1.5 cm και LSC στα 2.4, με τη μέγιστη τιμή στα 12.6 cm να παρατηρείται στη μέθοδο πλησιέστερου σημείου. Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των διαφορών δεν παρουσιάζουν μεγάλες τιμές και κυμαίνονται στα 16.2 cm και -34.1 cm αντίστοιχα.

Στις συγκρίσεις που ακολουθούν παρουσιάζονται τα στατιστικά αποτελέσματα των διαφορών των εννέα λύσεων του γεωειδούς με δεδομένα του CRYOSAT-2 με τη λύση συνδυασμού κατά μήκος της δορυφορικής αποστολής JASON-2 για τον κύκλο 176 και τη διάβαση 109. Περιλαμβάνονται 200 τιμές δεδομένων κατά μήκος της τροχιάς. Στην εικόνα 4.29 παρουσιάζεται το δορυφορικό ίχνος για την συγκεκριμένη αποστολή στην νότια περιοχή της Κρήτης που διέρχεται από τη Γαύδο.



Εικόνα 4.29 Τροχιά δορυφορικής αποστολής JASON-2, κύκλος 176, διάθαση 109

Στον πίνακα 4.36 παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκρίσεων των μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT-2 με τη λύση συνδυασμού.

Στατιστικά χαρακτηριστικά (m) συγκρίσεων των μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT -2 με τη λύση συνδυασμού κατά μήκος τροχιών του JASON-2

$N_{Sat} - N_{Model}$	Mean	Min	Max	RMS	Std
Linear	-0.065	-0.218	0.146	0.118	0.099
Bilinear	-0.057	-0.120	0.020	0.067	0.034
Cubic	-0.062	-0.248	0.181	0.127	0.111
NN	-0.101	-0.298	0.229	0.161	0.126
Kriging	-0.099	-0.159	0.019	0.108	0.043
LSC	-0.006	-0.062	0.027	0.024	0.023
I/O Comb	0.021	-0.015	0.047	0.025	0.013
GEOFOUR	0.071	-0.014	0.135	0.079	0.034
SPFOUR	0.073	-0.019	0.142	0.083	0.038

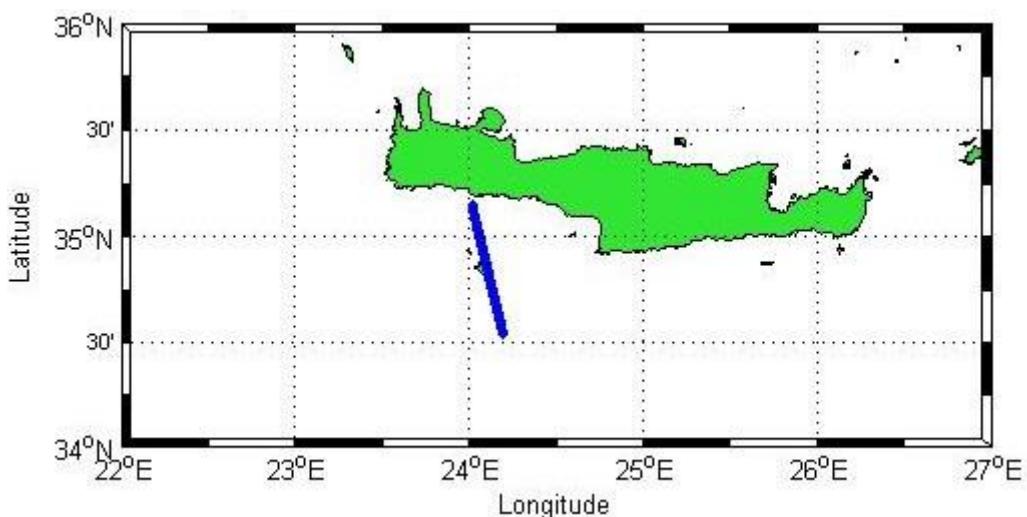
Πίνακας 4.36 Στατιστικά χαρακτηριστικά συγκρίσεων μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT- 2 με τη λύση συνδυασμού (JASON - 2, κύκλος 176, διάθαση 109)

Όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 4.36 οι μέσες τιμές των διαφορών κυμαίνονται μεταξύ -0.6 cm και -10.1 cm, με τη μικρότερη τιμή να παρουσιάζεται κατά τη σύγκριση με το μοντέλο LSC. Η τυπική απόκλιση παρουσιάζει μικρές τιμές για την μέθοδο εισόδου-εξόδου στα 1.3 cm και LSC στα 2.3, με τη μέγιστη τιμή στα 12.6 cm να παρατηρείται στη μέθοδο πλησιέστερου σημείου. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα κυμαίνεται από 1.4 cm για τη LSC έως και 16.1 για τη μέθοδο πλησιέστερου

σημείου. Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των διαφορών δεν παρουσιάζουν μεγάλες τιμές και βρίσκονται στα 22.9 cm και -29.8 cm αντίστοιχα.

Συγκρίσεις των εννέα λύσεων γεωειδούς του CRYOSAT-2 με τη βαρυτημετρική λύση και τη λύση συνδυασμού κατά μήκος τροχιών του SARAL

Στο παρακάτω τμήμα παρουσιάζεται η λύση συνδυασμού κατά μήκος της δορυφορικής αποστολής SARAL για τον κύκλο 176 και το διάβαση 571. Περιλαμβάνονται 400 τιμές δεδομένων κατά μήκος της τροχιάς. Στην εικόνα 4.30 παρουσιάζεται το δορυφορικό ίχνος για την συγκεκριμένη αποστολή στην νότια περιοχή της Κρήτης που διέρχεται από τη Γαύδο.



Εικόνα 4.30 Τροχιά δορυφορικής αποστολής SARAL, κύκλος 176, διάβαση 571

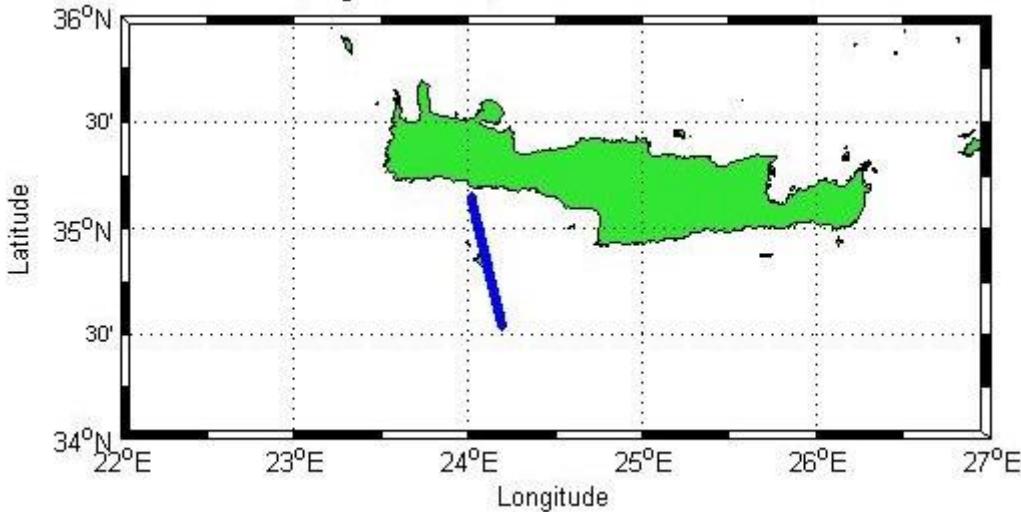
Παρακάτω στον πίνακα 4.37 παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκρίσεων των μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT-2 με τη λύση συνδυασμού κατά μήκος της τροχιάς του SARAL.

Στατιστικά χαρακτηριστικά (m) συγκρίσεων των μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT-2 με τη λύση συνδυασμού κατά μήκος τροχιών του SARAL					
$N_{Sat} - N_{Model}$	Mean	Min	Max	RMS	Std
Linear	-0.043	-0.171	0.106	0.113	0.066
Bilinear	-0.049	-0.092	0.013	0.056	0.026
Cubic	-0.034	-0.168	0.142	0.081	0.074
NN	-0.092	-0.222	0.246	0.113	0.099
Kriging	-0.088	-0.133	0.008	0.094	0.033
LSC	0.001	-0.025	0.026	0.015	0.015
I/O Comb	0.024	-0.004	0.045	0.027	0.013
GEOFOUR	0.058	-0.053	0.202	0.087	0.064
SPFOUR	0.06	-0.06	0.21	0.091	0.07

Πίνακας 4.37 Στατιστικά χαρακτηριστικά συγκρίσεων μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT-2 και της λύσης συνδυασμού (SARAL, κύκλος 176, διάβαση 571)

Όπως παρουσιάζεται στον παραπάνω πίνακα οι μέσες τιμές των διαφορών κυμαίνονται μεταξύ 0.1 cm και -9.2 cm, με τη μικρότερη τιμή να παρουσιάζεται κατά τη σύγκριση με το μοντέλο LSC και τη μεγαλύτερη κατά τη σύγκριση με το μοντέλο πλησιέστερου σημείου. Μικρή μέση τιμή, επίσης, παρουσιάζει η σύγκριση με το μοντέλο cubic στα -3.4 εκατοστά. Η τυπική απόκλιση παρουσιάζει μικρές τιμές για την μέθοδο LSC στα 1.5 cm και του συστήματος εισόδου-εξόδου στα 1.3, με τη μέγιστη τιμή στα 9.9 cm να παρατηρείται στη μέθοδο πλησιέστερου σημείου. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα κυμαίνεται από 1.5 cm για τη μέθοδο LSC έως και 11.3 για τη γραμμική λύση. Οι μέγιστη τιμή των διαφορών βρίσκεται στα 24.6 για τη μέθοδο του πλησιέστερου σημείου και η ελάχιστη στα -22.2 για την ίδια μέθοδο.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα στατιστικά αποτελέσματα των εννέα λύσεων γεωειδούς με δεδομένα CRYOSAT-2 με τη βαρυτημετρική λύση κατά μήκος της τροχιάς της δορυφορικής αποστολής SARAL για τον κύκλο 176 και τη διάβαση 571. Περιλαμβάνονται 400 τιμές δεδομένων κατά μήκος της τροχιάς. Στην εικόνα 4.31 παρουσιάζεται το δορυφορικό ίχνος για την συγκεκριμένη αποστολή στην νότια περιοχή της Κρήτης.



Εικόνα 4.31 Τροχιά δορυφορικής αποστολής SARAL, κύκλος 176, διάθαση 571

Στον πίνακα 4.38 παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκρίσεων των μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT-2 και της βαρυτημετρικής λύσης.

Στατιστικά χαρακτηριστικά (m) συγκρίσεων των μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT-2 με τη βαρυτημετρική λύση κατά μήκος τροχιών του SARAL

$N_{Sat} - N_{Model}$	Mean	Min	Max	RMS	Std
Linear	-0.059	-0.178	0.088	0.084	0.059
Bilinear	-0.064	-0.099	-0.012	0.068	0.023
Cubic	-0.049	-0.176	0.129	0.084	0.068
NN	-0.070	-0.231	0.233	0.120	0.097
Kriging	-0.104	-0.158	-0.028	0.108	0.030
LSC	-0.014	-0.057	0.03	0.025	0.020
I/O Comb	0.008	-0.02	0.048	0.018	0.016
GEOFOUR	0.043	-0.056	0.188	0.076	0.062
SPFOUR	0.044	-0.063	0.197	0.081	0.068

Πίνακας 4.38 Στατιστικά χαρακτηριστικά συγκρίσεων μοντέλων γεωειδούς του CRYOSAT - 2 με τη βαρυτημετρική λύση (SARAL, κύκλος 176, διάθαση 571)

Σύμφωνα με τον πίνακα 4.38 οι μέσες τιμές των διαφορών κυμαίνονται μεταξύ 0.8 cm και -10.4 cm, με τη μικρότερη τιμή να παρουσιάζεται κατά τη σύγκριση με το μοντέλο του συστήματος εισόδου-εξόδου και τη μεγαλύτερη κατά τη σύγκριση με το μοντέλο kriging. Μικρή μέση τιμή, επίσης, παρουσιάζει η σύγκριση με το μοντέλο LSC στα -1.4 εκατοστά. Η τυπική απόκλιση παρουσιάζει μικρές τιμές για την μέθοδο εισόδου-εξόδου στα 1.6 cm και LSC στα 2, με τη μέγιστη τιμή στα 9.7 cm να παρατηρείται στη μέθοδο πλησιέστερου σημείου. Οι μέγιστη τιμή των διαφορών

βρίσκεται στα 23.3 cm για τη μέθοδο πλησιέστερου σημείου και η ελάχιστη στα - 23.1 cm για την ίδια μέθοδο.

4.7. Προσδιορισμός μοντέλων βαρύτητας με φασματικές μεθόδους και σημειακή προσαρμογή και συγκρίσεις με το μοντέλο βαρύτητας της Κρήτης

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται διάφορες λύσεις για τη βαρύτητα όπως προέκυψαν από τις μεθόδους που αναλύθηκαν στο υποκεφάλαιο 4.1 και συγκρίνονται με τη βάση για τη βαρύτητα της περιοχής της Κρήτης (Tziavos et al. 2013, Mertikas et. al. 2013). Από τα αρχικά δεδομένα της δορυφορικής αποστολής, CRYOSAT-2 τα οποία αναφέρονται σε υπόλοιπα του γεωειδούς για την περιοχή μελέτης, υπολογίζονται τα αντίστοιχα υπόλοιπα των ανωμαλιών βαρύτητας. Οι αναφερθείσες ανωμαλίες βαρύτητας υπολογίστηκαν για βαθμούς 1834 και 2160 με σημειακή προσαρμογή, καθώς επίσης και με τη χρήση του ολοκληρώματος του Stokes και το πρόγραμμα GEOFOUR. Επίσης, παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά της βάσης για την περιοχή της Κρήτης, καθώς επίσης και τα υπόλοιπα της βαρύτητας για τη βάση αυτή μετά την αφαίρεση του γεωδυναμικού μοντέλου.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά για την περιοχή μελέτης στο σύνολό της, καθώς επίσης και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά για τη θαλάσσια περιοχή μόνο.

Στατιστικά χαρακτηριστικά ($mGal$) των υπολοίπων των ανωμαλιών βαρύτητας

Model	Mean	Min	Max	RMS	Std
LSC 1834	-0.186	-35.235	28.384	8.025	8.023
LSC 2160	-0.221	-29.703	27.006	7.113	7.110
GEOFOUR 1834	0.000	-60.170	50.360	8.755	8.756
GEOFOUR 2160	0.000	-55.180	45.300	7.794	7.794
DG res Database 1834	-0.963	-127.668	46.746	7.003	6.937
DG res Database 2160	-0.957	-126.799	38.888	6.191	6.117
Original Database	-55.724	-233.137	227.871	103.957	87.765

Πίνακας 4.39 Στατιστικά χαρακτηριστικά των ανωμαλιών βαρύτητας για ολόκληρη την περιοχή μελέτης

Στατιστικά χαρακτηριστικά ($mGal$) των υπολοίπων των ανωμαλιών βαρύτητας -

Θαλάσσια περιοχή

Model	Mean	Min	Max	RMS	Std
LSC 1834	-0.041	-35.235	28.384	8.292	8.292
LSC 2160	-0.101	-29.703	27.006	7.365	7.365
GEOFOUR 1834	0.150	-60.170	50.360	9.062	9.061
GEOFOUR 2160	0.127	-55.180	45.300	8.082	8.082
DG res Database 1834	-0.301	-38.446	36.294	4.418	4.407
DG res Database 2160	-0.274	-29.509	24.890	3.102	3.09

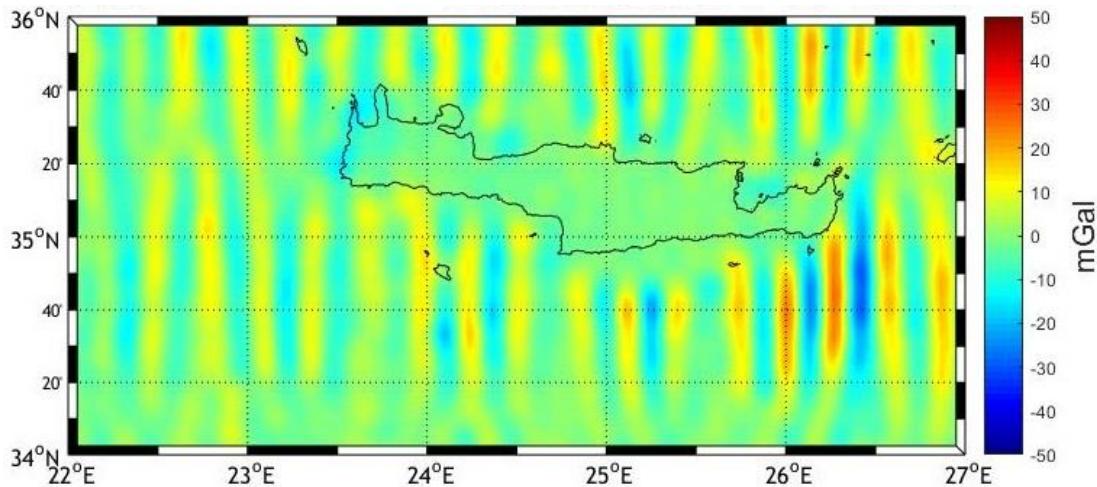
Πίνακας 4.40 Στατιστικά χαρακτηριστικά των ανωμαλιών βαρύτητας για τη θαλάσσια περιοχή μελέτης

Όσον αφορά τη συνολική περιοχή μελέτης παρατηρείται για τη μέθοδο LSC μία μέση τιμή της τάξεως των -0.2 mGal για το βαθμό 1834, η οποία αυξάνεται κατά 0.02 περίπου mGal για την περίπτωση βαθμού 2160. Οι ελάχιστες τιμές των υπολοίπων των ανωμαλιών βαρύτητας που παρουσιάζονται στην περιοχή είναι -35.3 και -29.7 αντίστοιχα, με παρόμοια συμπεριφορά να παρατηρείται στις μέγιστες τιμές, όπου για βαθμό 1834 είναι 28.4 και για βαθμό 2160 παρουσιάζεται μία μικρή πτώση στα 27 mGal. Η τυπική απόκλιση για την υπό εξέταση περίπτωση LSC είναι 8.1 και 7.1 mGal αντίστοιχα για βαθμούς 1834 και 2160. Στη λύση του Stokes με το πρόγραμμα GEOFOUR οι μέσες τιμές και για τις δύο περιπτώσεις παρουσιάζουν μηδενικές τιμές. Παρατηρείται αύξηση στις ακραίες τιμές για την περίπτωση των ελάχιστων κατά την οποία είναι -60.2 και -55.2 mGal για βαθμούς 1834 και 2160. Οι μέγιστες τιμές τους βρίσκονται στα 50.4 και 45.3 mGal. Οι τυπικές αποκλίσεις των μετρήσεων είναι στα 8.8 και 7.8 mGal αντίστοιχα. Από την εικόνα 4.36 μπορεί να προσδιοριστεί και η περιοχή στην νοτιοδυτική πλευρά της Κρήτης, όπου εμφανίζονται οι ακραίες τιμές. Επίσης, στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται τα

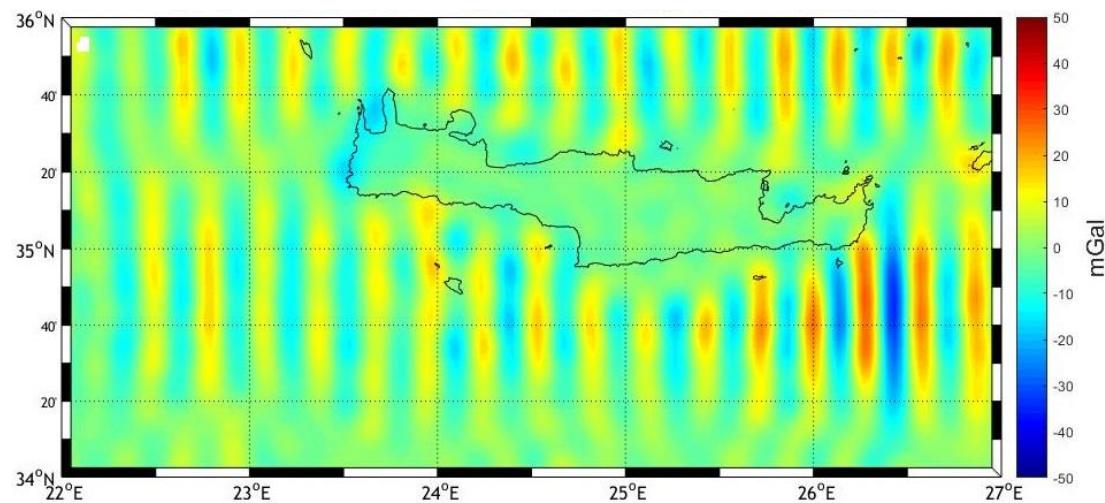
στατιστικά χαρακτηριστικά της βάσης που υπάρχει για την Κρήτη. Μετά την αφαίρεση του γεωδυναμικού μοντέλου τα υπόλοιπα της βαρύτητας παρουσιάζουν μέση τιμή ελαφρώς αυξημένη σε σχέση με τις προηγούμενες μεθόδους, στα -0.9 και -0.9 mGal για βαθμούς 1834 και 2160. Η αύξηση αυτή δικαιολογείται από το γεγονός ότι υπάρχουν δεδομένα ηπειρωτική περιοχή σε αντίθεση με τα δεδομένα των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν, τα οποία αναφέρονται μόνο σε θαλάσσια περιοχή καθότι είναι δεδομένα αλτιμετρίας. Οι ελάχιστες τιμές που παρατηρούνται βρίσκονται στα -127.7 και -126.8 mGal με τις μέγιστες τιμές να είναι στα 46.746 και 38.9 mGal αντίστοιχα για βαθμούς 1834 και 2160. Οι τυπικές αποκλίσεις βρίσκονται στα 6.9 και 6.2 mGal αντίστοιχα με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα να είναι 7 και 6.2 mGal.

Όσον αφορά μόνο τη θαλάσσια περιοχή μελέτης για την περίπτωση των LSC παρατηρείται μείωση της μέση τιμής στα -0.04 και -0.1 mGal για βαθμούς 1834 και 2160. Οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές παραμένουν αμετάβλητες με την τυπική απόκλιση να αυξάνεται στα 8.3 και 7.4 mGal αντίστοιχα. Στην περίπτωση του Stokes η μέση τιμή βρίσκεται στα 0.15 και 0.12 αντίστοιχα με τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές να παραμένουν ίδιες με την προηγούμενη περίπτωση. Οι τυπικές αποκλίσεις και για τους δύο βαθμούς αυξάνονται στα 9.1 και 8.1 mGal αντίστοιχα. Παρόμοια αύξηση παρατηρείται και στο μέσο τετραγωνικό σφάλμα αντιστοίχως. Πτώση της μέσης τιμής παρατηρείται και στην περίπτωση των στατιστικών της βάσης όπου για βαθμό 1834 η μέση τιμή διαμορφώνεται στα -0.3 mGal και για βαθμό 2160 στα -0.2 mGal. Πολύ μεγάλες διαφορές παρουσιάζονται στις ελάχιστες κυρίως, αλλά και στις μέγιστες τιμές. Οι ελάχιστες τιμές διαμορφώνονται στα -38 mGal και -29.6, ενώ οι μέγιστες στα 36.3 mGal και 24.9 mGal. Αυτό είναι κάτι αναμενόμενο, διότι η βάση στις ηπειρωτικές περιοχές και κυρίως στην περιοχή του Ψηλορείτη παρουσίαζε μεγάλες τιμές. Οι τυπικές αποκλίσεις βρίσκονται στα 4.4 και 3.1 mGal αντίστοιχα για βαθμούς 1834 και 2160.

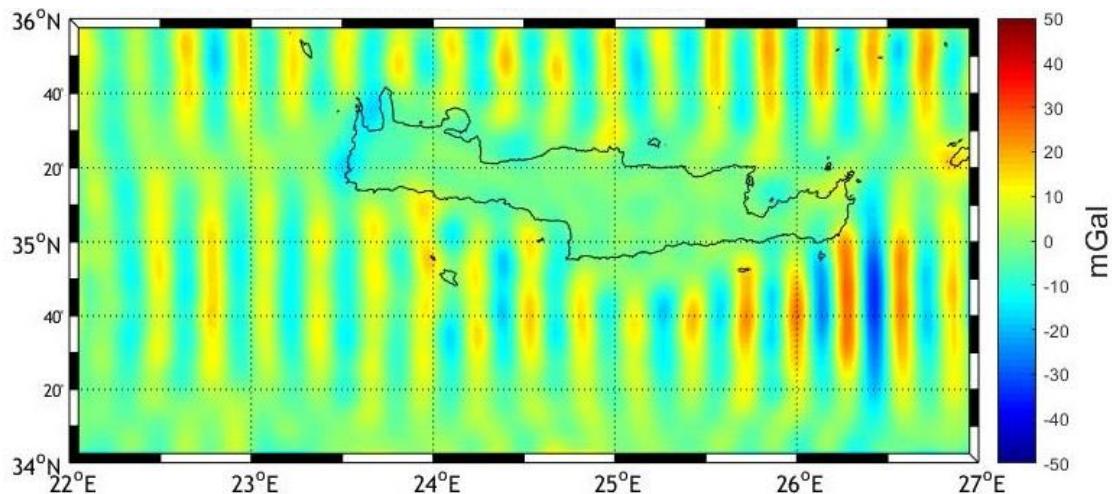
Στη συνέχεια απεικονίζονται οι διάφορες λύσεις όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω για κάθε μία μέθοδο. Επίσης παρουσιάζονται και τα υπόλοιπα των ανωμαλιών βαρύτητας από τη βάση της Κρήτης.



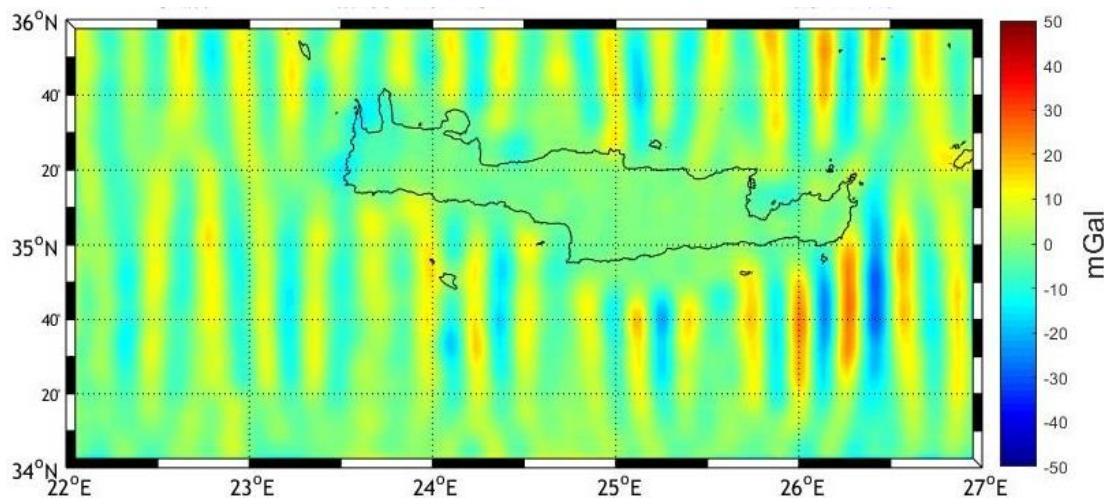
Εικόνα 4.32 Υπόλοιπα των ανωμαλιών βαρύτητας μέσω προσαρμογής από πρωτογενή SLA για βαθμό 2160



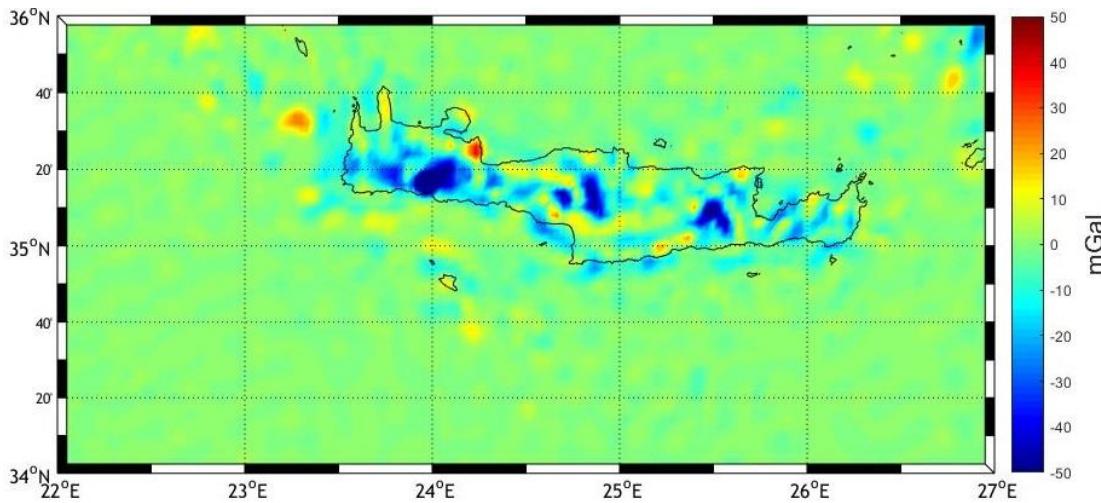
Εικόνα 4.33 Υπόλοιπα των ανωμαλιών βαρύτητας μέσω προσαρμογής από πρωτογενή SLA για βαθμό 1834



Εικόνα 4.34 Υπόλοιπα των ανωμαλιών βαρύτητας μέσω GEOFOUR από SLA LSC για βαθμό 1834



Εικόνα 4.35 Υπόλοιπα των ανωμαλιών βαρύτητας μέσω GEOFOUR από SLA LSC για βαθμό 2160



Εικόνα 4.36 Υπόλοιπα των ανωμαλιών βαρύτητας από τη βάση για την Κρήτη για βαθμό 2160

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων των υπολοίπων των ανωμαλιών βαρύτητας με τη βάση της Κρήτης στην οποία έχει αφαιρεθεί το γεωδυναμικό μοντέλο.

Στατιστικά χαρακτηριστικά διαφορών ανωμαλιών βαρύτητας της βάσης της Κρήτης και των μοντέλων υπολογισμού (mGal)

Database - Model	Mean	Min	Max	RMS	Std
LSC 1834	-0.777	-130.427	50.181	10.349	3.654
LSC 2160	-0.736	-125.413	42.213	9.190	3.472
GEOFOUR 1834	-0.973	-130.558	59.403	10.957	3.932
GEOFOUR 2160	-0.977	-125.549	54.414	9.78	3.682

Πίνακας 4.41 Στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκρίσεων της βάσης της Κρήτης με τα παραχθέντα μοντέλα

Όπως φαίνεται παραπάνω, κατά τη σύγκριση της βάσης της Κρήτης με τα μοντέλα βαρύτητας που παρήχθησαν παρατηρούνται μεγάλες τιμές όσον αφορά τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές, όπως ήταν αναμενόμενο στη στεριά, με τις ελάχιστες τιμές για την περίπτωση LSC να είναι στα -130.4 mGal για βαθμό 1834 και -125.4 mGal για βαθμό 2160. Οι μέσες τιμές κυμαίνονται στα -0.8 και -0.7 mGal αντίστοιχα. Οι τυπικές αποκλίσεις είναι στα 3.7 mGal και 3.5 mGal αντίστοιχα. Για τις συγκρίσεις με το ολοκλήρωμα του Stokes οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές βρίσκονται στα ίδια επίπεδα με προηγουμένως στα -130.6 mGal και -125.6 mGal και οι μέγιστες στα 59.4 και 54.4 mGal για βαθμούς 1834 και 2160. Οι μέσες τιμές βρίσκονται στα -0.9 και -0.9 mGal με τις αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις στα 3.9 και 3.7 mGal.

5. Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη του πεδίου βαρύτητας στην ευρύτερη περιοχή της Κρήτης, η οποία παρουσιάζει ιδιαίτερο γεωδαιτικό, γεωδυναμικό, γεωλογικό και ωκεανογραφικό ενδιαφέρον. Η μελέτη συνίσταται στη δημιουργία διαφόρων γεωδυναμικών προσεγγίσεων στη περιοχή εκμεταλλευόμενη τα δεδομένα της δορυφορικής αλτιμετρίας της δορυφορικής αποστολής του CRYOSAT-2 για τη χρονική περίοδο 2010-2015.

Συνολικά προέκυψαν 9 λύσεις μοντέλων ΜΣΘ, 9 λύσεις γεωειδούς και 4 λύσεις βαρύτητας.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των μοντέλων ΜΣΘ/γεωειδούς ήταν η ακόλουθη.

Στο πρώτο στάδιο, δημιουργήθηκε ένα πλέγμα 2arcmin της περιοχής μελέτης. Χρησιμοποιώντας τα πρωτογενή δεδομένα SLA της δορυφορικής αποστολής CRYOSAT-2, τα οποία κάλυπταν την περιοχή της μελέτης, έγινε πρόγνωση στις κορυφές του πλέγματος για διάφορες μεθόδους παρεμβολής (γραμμική, kriging, διγραμμική, πλησιέστερου σημείου, κυβική, σημειακή προσαρμογή). Επιπρόσθετα, με τη χρήση φασματικών τεχνικών μέσω του ολοκληρώματος του Stokes, για επίπεδη και σφαιρική προσέγγιση, καθώς και με ένα σύστημα διπλής εισόδου/απλής εξόδου με είσοδο υπολοίπων υψομέτρων γεωειδούς από τη λύση LSC και υπολοίπων τιμών βαρύτητας από τη βάση της βαρύτητας για την περιοχή της Κρήτης υπολογίσθηκαν SLA για το πλέγμα της περιοχής μελέτης. Οι υπολογισμοί αυτοί έγιναν για βαθμούς 1834 και 2160. Κατόπιν, υπολογίσθηκαν τα υψόμετρα του γεωειδούς στις κορυφές του πλέγματος των 2arcmin χρησιμοποιώντας το γεωδυναμικό μοντέλο EGM2008. Με τα υπολογισθέντα υψόμετρα του γεωειδούς και SLA προχωρήσαμε στη δημιουργία και απεικόνιση των μοντέλων ΜΣΘ. Στη συνέχεια, με τη χρήση του μοντέλου Δυναμικής Θαλάσσιας Τοπογραφίας που χρησιμοποιήθηκε για την περιοχή μελέτης (Rio et al. 2007) υπολογίσθηκαν οι λύσεις για το γεωειδές. Για τη δημιουργία των μοντέλων βαρύτητας από τα SLA, αφού

υπολογίστηκαν οι εμπειρικές και αναλυτικές συναρτήσεις συμμεταβλητότητας των υπολοίπων τιμών βαρύτητας, έγινε η πρόγνωση των ανωμαλιών βαρύτητας με LSC για την υπό εξέταση περιοχή. Ακόμη, με τη χρήση του ολοκληρώματος του Stokes υπολογίσθηκαν τα υπόλοιπα της βαρύτητας για την επίπεδη προσέγγιση για βαθμό 1834 και 2160.

Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την αξιολόγηση των μοντέλων ΜΣΘ και γεωειδούς από τις μεταξύ τους συγκρίσεις και από τις συγκρίσεις με το γεωειδές για την περιοχή της Κρήτης που προσδιορίσθηκε σε προγενέστερη εργασία (Tziavos et al. 2013). Επιπλέον συγκρίσεις έγιναν μεταξύ των λύσεων γεωειδούς που υπολογίσθηκαν και της λύσης συνδυασμού βαρύτητας και αλτιμετρίας και της βαρυτημετρικής λύσης κατά μήκος των δορυφορικών διαβάσεων των JASON-1, JASON-2 και SARAL. Τέλος, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των λύσεων βαρύτητας και της διαθέσιμης βάσης βαρύτητας της Κρήτης για ολόκληρη την περιοχή μελέτης.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι τα ακόλουθα.

Τα αλτιμετρικά μοντέλα ΜΣΘ συμφωνούν σε τιμές σταθερής απόκλισης ± 1 έως ± 2 cm και ± 0.5 έως ± 4 cm ως προς τη μέση τιμή. Κατά τη σύγκριση του μοντέλου που προέκυψε από το σύστημα εισόδου-εξόδου με τη λύση kriging, η μέση τιμή βρίσκεται στα -0.6 cm και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση στα ± 0.8 cm. Οι δύο λύσεις της φασματικής τεχνικής για επίπεδη και σφαιρική προσέγγιση παρουσιάζουν μηδενική μέση τιμή κατά τη σύγκρισή τους και η τυπική απόκλιση βρίσκεται στα ± 0.2 cm.

Τα στατιστικά αυτά μεγέθη, τόσο ως προς την ακρίβεια όσο και ως προς τη διαφορά στάθμης είναι πολύ ικανοποιητικά και καλύπτουν τις απαιτήσεις ενός μεγάλου φάσματος εφαρμογών του πεδίου βαρύτητας και άλλων επιστημών στις θαλάσσιες περιοχές.

Παρόμοια με τα μοντέλα ΜΣΘ, τα αλτιμετρικά μοντέλα για το γεωειδές συμφωνούν σε τιμές σταθερής απόκλισης ± 1 έως ± 2 cm και 0.5 – 5 cm ως προς τη μέση τιμή.

Τα στατιστικά αυτά μεγέθη, τόσο ως προς την ακρίβεια όσο και ως προς τη διαφορά στάθμης κρίνονται, επίσης, ικανοποιητικά και καλύπτουν τις απαιτήσεις ενός μεγάλου φάσματος εφαρμογών του πεδίου βαρύτητας και άλλων επιστημών στις θαλάσσιες περιοχές.

Η σύγκριση των αλτιμετρικών λύσεων με το διαθέσιμο γεωειδές για την Κρήτη δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, της τάξης των ± 5 cm σε τιμές σταθερής απόκλισης. Παρατηρείται όμως μία διαφορά στάθμης (μέση τιμή) της τάξης των 22 cm με εξαίρεση τη λύση με τη μέθοδο kriging, όπου η αντίστοιχη μέση τιμή των συγκρίσεων κυμαίνεται στα 18 cm. Η μεγάλη αυτή διαφορά στάθμης, οφείλεται στις μεγάλες τιμές που προκύπτουν κατά τις συγκρίσεις και παρατηρούνται σε κάθε περίπτωση στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης, όπου παρουσιάζονται ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του πεδίου βαρύτητας και έντονα δυναμικά πεδία. Η παραπάνω σύγκριση αποτελεί μία αξιολόγηση εξωτερικής ακρίβειας των μοντέλων.

Οι συγκρίσεις των διαφόρων λύσεων για το γεωειδές με τα αντίστοιχα υψόμετρα που προκύπτουν από τις λύσεις των δορυφορικών αποστολών εμφανίζουν διαφορές, οι οποίες σχολιάζονται στη συνέχεια.

Λαμβάνοντας υπόψη τις καλύτερες λύσεις που προέκυψαν για κάθε σύγκριση, το μοντέλο γεωειδούς της βαρυτημετρικής λύσης κατά μήκος του JASON-1, κύκλος 100, διάβαση 018 παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά τη σύγκρισή του με τα αλτιμετρικά μοντέλα, της τάξης των ± 1.5 cm σε τιμές σταθερής απόκλισης για τη λύση του συστήματος διπλής εισόδου/απλής εξόδου και μηδενικές τιμές όσον αφορά τη διαφορά στάθμης. Για την ίδια σύγκριση η λύση LSC παρουσιάζει συστηματική διαφορά στα -4 cm, ενώ η σταθερή απόκλιση βρίσκεται στα ± 2.3 cm, τιμές που και στις δύο περιπτώσεις χαρακτηρίζονται ικανοποιητικές.

Το μοντέλο γεωειδούς της βαρυτημετρικής λύσης κατά μήκος του JASON-1, κύκλος 100, διάβαση 109 δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά τη σύγκρισή του με τα μοντέλα γεωειδούς της παρούσας μελέτης, της τάξης των ± 1.5 cm σε τιμές σταθερής απόκλισης για τη λύση του συστήματος διπλής εισόδου/απλής εξόδου και όσον αφορά τη συστηματική διαφορά στα -0.4 cm. Για την ίδια σύγκριση η λύση LSC παρουσιάζει συστηματική διαφορά στα -3.2 cm, ενώ η σταθερή απόκλιση βρίσκεται στα ± 2.5 cm, τιμές που και στις δύο περιπτώσεις χαρακτηρίζονται ικανοποιητικές.

Το μοντέλο γεωειδούς της βαρυτημετρικής λύσης κατά μήκος του JASON-1, κύκλος 176, διάβαση 109 εμφανίζει ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά τη σύγκρισή του με τα μοντέλα γεωειδούς που υπολογίσθηκαν, της τάξης των ± 1.6 cm σε τιμές σταθερής απόκλισης για τη λύση του συστήματος διπλής εισόδου/απλής εξόδου και -0.4 cm όσον αφορά τη διαφορά στάθμης. Για την ίδια σύγκριση η λύση LSC παρουσιάζει συστηματική διαφορά στα -3.2 cm, ενώ η σταθερή απόκλιση βρίσκεται στα ± 2.6 cm. Τα στατιστικά αυτά μεγέθη, τόσο ως προς την ακρίβεια όσο και ως προς τη διαφορά στάθμης κρίνονται ικανοποιητικά και καλύπτουν τις απαιτήσεις ενός μεγάλου φάσματος εφαρμογών του πεδίου βαρύτητας.

Το μοντέλο γεωειδούς της λύσης συνδυασμού βαρύτητας και αλτιμετρίας κατά μήκος του JASON-2, κύκλος 174, διάβαση 018 παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά τη σύγκρισή του με τα μοντέλα γεωειδούς της παρούσας μελέτης. Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων είναι της τάξης των ± 1.7 cm σε τιμές σταθερής απόκλισης για τη λύση του συστήματος διπλής εισόδου/απλής εξόδου και όσον αφορά τη συστηματική διαφορά στα -1.5 cm. Για την ίδια σύγκριση η λύση LSC παρουσιάζει συστηματική διαφορά στα -2.5 cm, ενώ η σταθερή απόκλιση βρίσκεται στα ± 2.7 cm, τιμές που και στις δύο περιπτώσεις χαρακτηρίζονται ικανοποιητικές.

Το μοντέλο γεωειδούς της βαρυτημετρικής λύσης κατά μήκος του JASON-2, κύκλος 174, διάβαση 018 δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά τη σύγκρισή του με τα μοντέλα γεωειδούς που υπολογίσθηκαν στην παρούσα μελέτη. Οι λύσεις που κυριαρχούν και σε αυτήν την περίπτωση είναι η LSC και η λύση του συστήματος διπλής εισόδου/απλής εξόδου. Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων είναι της τάξης

των ± 1.5 cm σε τιμές σταθερής απόκλισης για τη λύση του συστήματος διπλής εισόδου/απλής εξόδου και όσον αφορά τη συστηματική διαφορά οι τιμές είναι μηδενικές. Για την ίδια σύγκριση η λύση LSC παρουσιάζει συστηματική διαφορά στα -4 cm, ενώ η σταθερή απόκλιση βρίσκεται στα ± 2.4 cm τιμές που μπορούν να χαρακτηριστούν αποδεκτές για μία πληθώρα εφαρμογών του πεδίου βαρύτητας.

Το μοντέλο γεωειδούς της λύσης συνδυασμού βαρύτητας και αλτιμετρίας κατά μήκος του JASON-2, κύκλος 176, διάβαση 109 παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά τη σύγκρισή του με τα μοντέλα γεωειδούς που υπολογίσθηκαν στην παρούσα μελέτη. Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων είναι της τάξης των ± 1.3 cm σε τιμές σταθερής απόκλισης για τη λύση του συστήματος διπλής εισόδου/απλής εξόδου και η συστηματική διαφορά βρίσκεται στα 2.1 cm. Για την ίδια σύγκριση η λύση LSC παρουσιάζει συστηματική διαφορά στα -0.6 cm, ενώ η σταθερή απόκλιση βρίσκεται στα ± 2.3 cm. Επίσης, αξιόλογα αποτελέσματα παρουσιάζει η σύγκριση με τη λύση της διγραμμικής παρεμβολής με τη διαφορά στάθμης να βρίσκεται στα -5.7 cm και τη σταθερή απόκλιση στα ± 3.4 cm.

Το μοντέλο γεωειδούς της λύσης συνδυασμού βαρύτητας και αλτιμετρίας κατά μήκος του SARAL, κύκλος 176, διάβαση 571 παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά τη σύγκρισή του με τα μοντέλα γεωειδούς του CRYOSAT-2 που δημιουργήθηκαν. Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων είναι της τάξης των ± 1.3 cm σε τιμές σταθερής απόκλισης για τη λύση του συστήματος διπλής εισόδου/απλής εξόδου, τη στιγμή που η συστηματική διαφορά βρίσκεται στα 2.4 cm. Για την ίδια σύγκριση η λύση LSC παρουσιάζει συστηματική διαφορά στα 0.1 cm, ενώ η σταθερή απόκλιση βρίσκεται στα ± 1.5 cm. Επίσης, αξιόλογα αποτελέσματα παρουσιάζει η σύγκριση με τη λύση της διγραμμικής παρεμβολής με τη διαφορά στάθμης να βρίσκεται στα -4.9 cm και τη σταθερή απόκλιση στα ± 2.6 cm. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκρίσεων και για αυτή τη λύση του SARAL κρίνονται ικανοποιητικές.

Το μοντέλο γεωειδούς της βαρυτημετρικής λύσης κατά μήκος του SARAL, κύκλος 176, διάβαση 571 παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά τη σύγκρισή του

με τα μοντέλα γεωειδούς που δημιουργήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων είναι της τάξης των ± 1.6 cm σε τιμές σταθερής απόκλισης για τη λύση του συστήματος διπλής εισόδου/απλής εξόδου, τη στιγμή που η συστηματική διαφορά βρίσκεται στα 0.8 cm. Για την ίδια σύγκριση η λύση LSC παρουσιάζει συστηματική διαφορά στα 1.4 cm, ενώ η σταθερή απόκλιση βρίσκεται στα ± 2 cm. Επίσης, αξιόλογα αποτελέσματα παρουσιάζει η σύγκριση με τη λύση της διγραμμικής παρεμβολής με τη διαφορά στάθμης να βρίσκεται στα -6.4 cm και τη σταθερή απόκλιση στα ± 2.3 cm. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκρίσεων και για αυτή τη λύση του SARAL κρίνονται ικανοποιητικές.

Μία αξιολόγηση της εξωτερικής ακρίβειας των μοντέλων βαρύτητας που δημιουργήθηκαν παρουσιάζεται μέσω της σύγκρισης με το προϋπάρχον μοντέλο της περιοχής για βαθμούς 1834 και 2160. Κατά τη σύγκριση με τη λύση LSC για βαθμό 1834 η μέση τιμή των αποτελεσμάτων βρίσκεται στα -0.8 mGal και η τυπική απόκλιση στα ± 3.7 mGal. Το μοντέλο που προέκυψε από τη φασματική λύση για την επίπεδη προσέγγιση παρουσιάζει μέση τιμή στα -0.9 mGal τη στιγμή που η τυπική απόκλιση υπολογίσθηκε στα ± 3.9 mGal. Για βαθμό 2160 η σύγκριση του της βαρύτητας με το μοντέλο LSC παρουσιάζει μικρή διαφοροποίηση ως προς τη μέση τιμή η οποία βρίσκεται στα -0.7 mGal και η τυπική απόκλιση στα ± 3.5 mGal. Όσον αφορά τη σύγκριση με το μοντέλο της φασματικής επίπεδης προσέγγισης παρουσιάζει μέση τιμή -0.9 mGal και τυπική απόκλιση ± 3.7 mGal.

Τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής μπορεί στο μέλλον να αξιοποιηθούν για τον προσδιορισμό ακριβέστερων λύσεων του γεωειδούς στην περιοχή μελέτης με τη χρησιμοποίηση επιφανειών αναφοράς συνδυασμού. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη φασματική ανάλυση των γεωδυναμικών μοντέλων των δορυφορικών αποστολών GOCE και GRACE και του EGM2008, ώστε η κάθε λύση να αποδίδει με βέλτιστο τρόπο τα χαρακτηριστικά του πεδίου βαρύτητας στην ανάλογη φασματική περιοχή. Επίσης η χωρική ανάλυση των λύσεων για το γεωειδές μπορεί να αυξηθεί (π.χ. 1arcmin) με την προσθήκη νέων μετρήσεων στη διαθέσιμη βάση βαρύτητας για την ευρύτερη περιοχή της Κρήτης και της Γαύδου.

Βιβλιογραφία

- Andersen O. B. (2010). DTU10 Global Gravity field and mean sea surface. In 2nd International Symposium of the gravity field of the Earth (IGFS2010), Fairbanks, Alaska.
- Drinkwater M. R., Francis R., Ratier G., Wingham D. J. (2004). The European Space Agency's Earth Explorer Mission CryoSat: measuring variability in the cryosphere, *Annals of Glaciology*, p. 39.
- Mertz F., Vinca R., Delamarche A., Larnicol G. (2013). PRODUCT USER MANUAL For Sea Level SLA products, Copernicus Marine environment monitoring service.
- Gruber Th. (2009). Evaluation of the EGM2008 Gravity Field by Means of GPS-Levelling and Sea Surface Topography Solutions, Newtons' Bulletin.
- Mertikas S. P., Daskalakis A., Tziavos I. N., Andersen O. B., Vergos G. S., Tripolitsiotis A., Zervakis V., Frantzis X., Partsinevelos P. (2013). Altimetry, bathymetry and geoid variations at the Gavdos permanent Cal/Val facility, *Advances in Space Research* 51, pp. 1418-1437.
- Marple S. L. Jr. (1987). Digital spectral analysis with applications, Prentice-Hall Signal Processing Series, USA.
- Mikhail M. E. (1976), Observations and Least Squares, IEP - Dun-Donnelley.
- Pavlis N.K., Holmes S. A., Kenyon S. C., Factor J. K. (2008). An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008, General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, National Geospatial Intelligence Agency.
- Pavlis N. K., Holmes S. A., Kenyon S. C., Factor J. K. (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), *Journal of Geophysical Research*, vol. 117.

Rio M.-H, Fernandez F. (2004). A mean dynamic topography computed over the world ocean from altimetry, in situ measurements, and a geoid model, *Journal of Geophysical Research*, vol. 109.

Rio M.-H., Poulain P.-M., Pascual A., Mauri E., Larnicol G., Santoleri R. (2007). A Mean Dynamic Topography of the Mediterranean Sea computed from altimetric data, in situ measurements and a general circulation model, *Journal of Marine Systems* 65 pp.484 - 508.

Sansò F., Sideris M.G. (1995). On the similarities and differences between system theory and least-squares collocation in physical geodesy, Presented at the XXI IUGG General Assembly, Boulder, Colorado, July 2-4, 1995.

Tziavos I. N., G. S. Vergos, S. P. Mertikas, A. Daskalakis, V.N. Grigoriadis, A. Tripolitsiotis (2013). The contribution of local gravimetric geoid models to the calibration of satellite altimetry data and an outlook of the latest GOCE GGM performance in Gavdos, *Advances in Space Research* 51, pp. 1502-1522.

Tziavos I.N., Li, J., Sideris M.G. (1996). Optimal spectral combination of satellite altimetry and marine gravity data, Presented at the XXI EGS General Assembly, The Hague, Netherlands, 6-10 May, 1996, in Proceedings (Tziavos and Vermeer eds), Techniques for local geoid determination, pp. 41-56, Masala, 1996.

Tscherning C.C. (1976). Covariance Expressions for Second and Lower Order Derivatives of the Anomalous Potential, Reports of the Department of Geodetic Science No. 225, The Ohio State University, Columbus, Ohio.

Tscherning C.C. (1993). Computation of covariances of derivatives of the anomalous gravity potential in a rotated reference frame, *Manuscripta Geodaetica*, Vol. 18, no. 3, pp. 115-123.

Tscherning C. C., Forsberg R., Knudsen P. (1992). The GRAVSOFT package for geoid determination.

Tscherning C.C. (1994). Gravity field modelling with GRAVSOFT least-squares collocation, Lecture Notes, International School for the Determination and Use of the Geoid, Milano, Oct. 10-15. International Geoid Service, pp. 101-134.

Wenzel H. G. (1982). Geoid computation by least squares spectral combination using integral kernels, Proceedings IAG, pp 438-453, Tokyo.

Wessel P., Smith W.H.F. (1998). New improved version of Generic Mapping Tools released, Eos Trans. AGU 79 (47), 579.

Wingham D. (1999). The First of the European Space Agency's Opportunity Missions: CryoSat, Earth Observation Quarterly, 63, ESA.

Wingham J.D., Francis R.C., Baker S., Bouzinac C., Brockley D., Cullen R., P. de Chateau-Thierry, Laxon W.S., Mallow U., Mavrocordatos C., Phalippou L., Ratier G., Rey L., Rostan F., Viau P., Wallis W.D. (2006). CryoSat: A mission to determine the fluctuations in Earth's land and marine ice fields, Advances in Space Research, vol.37, p.841-871, doi:10.1016/j.asr.2005.07.027.

Αραμπέλος Δ., Τζιαβός Η. Ν. (2007). Εισαγωγή στο πεδίο βαρύτητας της γης, Εκδόσεις Ζήτη.

Βέργος Γ. Σ. (2006). Μελέτη του πεδίου βαρύτητας και της θαλάσσιας τοπογραφίας στον ελληνικό χώρο με συνδυασμό επίγειων δεδομένων και δεδομένων των νέων δορυφορικών αποστολών CHAMP και GRACE, Διδακτορική Διατριβή, ΤΑΤΜ-ΑΠΘ.

Δεληκαράογλου Δ. (2010). Φυσική Γεωδαισία - Θεωρητικές και Τεχνολογικές Βάσεις, www.scribd.com/doc/48502442/

Κατσάμπαλος Κ., Τζιαβός Η. (1991). Φυσική Γεωδαισία, Εκδόσεις Ζήτη

Τζιαβός Η.Ν. (1984). Μελέτη του Βέλτιστου Συνδυασμού Ετερογενών Δεδομένων για τον Προσδιορισμό του Γεωειδούς με Εφαρμογές στον Ελληνικό Χώρο, Διδακτορική Διατριβή, ΤΑΤΜ-ΑΠΘ.

Τζιαβός Η.Ν. (2002). Αλγόριθμοι πολλαπλής εισόδου εξόδου, Φασματικές και Στοχαστικές Μέθοδοι, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών, ΤΑΤΜ-ΑΠΘ.

Χριστίδου Ε. (2014). CRYOSAT – Η δορυφορική αποστολή της ESA για τη μελέτη της κρυόσφαιρας, Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή Α.Π.Θ.

Πηγές από το διαδίκτυο

Aviso. Ανάκτηση Ιανουάριος 2017, από <http://www.aviso.oceanobs.com>

Centre National d' Etudes Spatiales. Ανάκτηση Ιανουάριος 2017, από <http://www.cnes.fr>

BBC. Ανάκτηση Ιανουάριος 2017, από <http://news.bbc.co.uk>

ESA. Ανάκτηση Ιανουάριος 2017, από <http://www.earth.esa.int>

ESA. Ανάκτηση Ιανουάριος 2017, από <http://blogs.esa.int>

NASA. Ανάκτηση Ιανουάριος 2017, από <http://sealevel.jpl.nasa.gov>

NERC Earth Observation Data Centre. Ανάκτηση Ιανουάριος 2017, από <http://www.neodc.rl.ac.uk>