ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



Προσδιορισμός Αξιοπιστίας Μοντέλων Γεωειδούς, Μέσω Κινηματικού Προσδιορισμού της Θαλάσσιας Στάθμης με GPS, με Εφαρμογή στη Βαθμονόμηση Δορυφόρων Αλτιμετρίας.

> Διπλωματική Εργασία Αθανάσιος Π. Κουρούκλης

> > <u>Εξεταστική Επιτροπή:</u> Στυλιανός Π. Μερτίκας, Καθηγητής (επιβλέπων) Ευάγγελος Παλαιολόγος, Αναπληρωτής Καθηγητής Παναγιώτης Παρτσινέβελος, Λέκτορας

Χανιά Δεκέμβριος 2010



στη γυναίκα της ζωής μου Όλγα

<u>--- Περίληψη ---</u>

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, αφορά στον προσδιορισμό της αξιοπιστίας των μοντέλων του γεωειδούς, για την περιοχή νότια της Κρήτης γύρω από τη Νήσο Γαύδο, μέσω κινηματικού προσδιορισμού της θαλάσσιας στάθμης με GPS.

Τα μοντέλα του γεωειδούς για αυτή την περιοχή ενδιαφέροντος, έχουν δημιουργηθεί με τη χρήση δεδομένων βαρυτημετρίας και αλτιμετρίας της θαλάσσιας περιοχής, και είναι απαραίτητα για τη βαθμονόμηση των δορυφόρων αλτιμετίας, οι οποίοι μετρούν αδιάλειπτα τη διακύμανση της στάθμης της θάλασσας.

Η ακρίβεια της μέτρησης της διακύμανσης της στάθμης της θάλασσας, εξαρτάται εκτός άλλων παραμέτρων, και από την ακρίβεια του μοντέλου του γεωειδούς, το οποίο όμως, δεν έχει την απαιτούμενη χωρική διακριτική ικανότητα που απαιτείται για τη δορυφορική αλτιμετρία. Έτσι τίθεται θέμα προσδιορισμού της αξιοπιστίας του μοντέλου του γεωειδούς για την περιοχή της Γαύδου, ώστε να επικυρωθούν οι μετρήσεις αλτιμετρίας των δορυφόρων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα εξεταστεί η αξιοπιστία των μοντέλων του γεωειδούς, με σκοπό τη βαθμονόμηση των δορυφόρων αλτιμετίας Jason-1 και Jason-2.

Ο προσδιορισμός της αξιοπιστίας των μοντέλων, έγινε μέσω κινηματικού προσδιορισμού της θαλάσσιας στάθμης με GPS.

Για την πραγματοποίηση του κινηματικού GPS, χρησιμοποιήθηκε πλωτό μέσο πάνω στο οποίο είχε εγκατασταθεί δέκτης GPS. Τη βάση του κινηματικού GPS, αποτέλεσε σταθμός GPS εγκατεστημένος από το Εργαστήριο Γεωδαισίας και Γεωπληροφορικής των Γεωεπιστημών του Πολυτεχνείου Κρήτης στο λιμάνι "Καραβές" στη νήσο Γαύδο. Παράλληλα χρησιμοποιήθηκαν παλιρροιογράφοι μέτρησης της στάθμης της θάλασσας τόσο στο σταθμό βάσης, όσο και πάνω στο πλωτό μέσο.

Πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές περίοδοι μετρήσεων της στάθμης της θάλασσας, πάνω στο ίχνος της τροχιάς των δορυφόρων αλτιμετρίας στην επιφάνεια της θάλασσας.

Τα αποτελέσματα του κινηματικού προσδιορισμού με GPS του ύψους της στάθμης της θάλασσας πάνω από το ελλειψοειδές αναφοράς, συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές που δίνονται από τα μοντέλα του γεωειδούς που έχουν δημιουργηθεί για την περιοχή.

Τα αποτελέσματα του ελέγχου αυτού, έδωσαν χρήσιμα συμπεράσματα για τη βαθμονόμηση των μετρήσεων των δορυφόρων αλτιμετρίας ειδικά για την εν λόγω περιοχή.

<u>Λέξεις Κλειδιά:</u> Δορυφορική Αλτιμετρία, Δορυφόρος Αλτιμετρίας, Βαθμονόμηση Δορυφόρων Αλτιμετρίας, Κινηματικό GPS, Γεωειδές, Μέση Στάθμη Θάλασσας, Ύψος Στάθμης Θάλασσας, Παλιρροιογράφος, Βαθυμετρία, Κρήτη, Γαύδος.

<u>---- Περίληψη στην Αγγλική Γλώσσα – Abstract ---</u>

In this thesis, the reliability of the geoid models for the area south of Crete around the island of Gavdos is examined through the determination of sea surface height (SSH) with kinematic GPS.

The geoid models for the area of interest, have been developed by the use of gravimetric and altimetric data, and form the fundamental surface that needs to be accurately determined for the Calibration/Validation of the measurements of altimetric satellites, such as Jason-1 and Jason-2.

The accurate determination of the altimetric bias depends on, excluding other considerations, the accuracy of the geoid model. The developed model does not have the required spatial resolution needed for satellite altimetry in the region of interest. This fact may lead to errors in the determination of local geoid heights because (1) the geoid slope in the area is rather high (the geoid height at the south coast of Crete is about 21m while south of Gavdos decreases to about 12 m); (2) The large sea depths south of Gavdos (more than 3000m) may have affected the accuracy of the geoid model. So it comes necessary to validate the geoid model for the region of Gavdos by using independent means such as kinematic GPS surveys.

The kinematic GPS surveys were performed using a boat, and on-board instruments (Dual frequency GPS receiver and water level sensor in order to accurately determine the height difference between the GPS antenna and the sea surface). The base stations used for kinematic GPS processing , was a set of two continuous operating (CORS) GNSS stations (GVD7 and GVD8) established by the Laboratory of Geodesy & Geomatics Engineering of the Technical University of Crete in "Karave" harbor on the Isle of Gavdos.

Three different kinematic surveys were performed (the first on September 2009, the second on August 2010 and the third on September 2010) along the ground tracks of the altimetry satellites Jason-1 and Jason-2.

The results of kinematic GPS where further processed in order to determine the Sea Surface Height (SSH) above the reference ellipsoid, which is the reference ellipsoid of satellites Jason-1 and Jason-2. The corresponding results were then compared with the geoid values given by the developed model.

The results of the analysis gave useful conclusions about the geoid behavior in the area south of Crete and created a milestone for further analysis.

<u>Keywords</u>: Satellite Altimetry, Geoid, Gavdos, Crete, SSH, Kinematic GPS, Tide Gauge, Calibration/ Validation, CAL/VAL, Altimetry Satellite Ground Tracks

<u>--- Πρόλογος ---</u>

Η ολοκλήρωση της προσπάθειας ενός φοιτητή του Πολυτεχνείου για να γίνει Μηχανικός, είναι η Διπλωματική Εργασία. Στη ζωή μου πολλά γεγονότα μου κόστισαν σε χρόνο, και έτσι όταν έφτασε η στιγμή της επιλογής θέματος, ήθελα κάτι μοναδικό. Δεν με φόβιζε ούτε ο όγκος ούτε η δυσκολία. Εξ' άλλου ήξερα που θα το αναζητούσα. Στον καθηγητή που τα φοιτητικά μου χρόνια με βοήθησε να αποκτήσω τις γνώσεις και μου δίδαξε τον τρόπο σκέψης. Τον Καθηγητή κ. Στυλιανό Μερτίκα.

«Έχουμε ένα πρόβλημα στο εργαστήριο με το μοντέλο του γεωειδούς κάτω στη Γαύδο…» είπε. Αρκούσε. Έγινε το θέμα μου. Τον ευχαριστώ θερμά, όχι μόνο για τη συμπαράσταση και τη βοήθειά του, αλλά και γιατί για άλλη μια φορά, με βοήθησε να ασχοληθώ και να μάθω κάτι μοναδικό.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή Ευάγγελο Παλαιολόγο, και τον Λέκτορα Παναγιώτη Παρτσινέβελο, για τις εύστοχες παρατηρήσεις και προσφορά στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες αξίζουν στο επιστημονικό προσωπικό του Εργαστηρίου Γεωδαισίας και Γεωπληροφορικής των Γεωεπιστημών, για την άψογη συνεργασία τους σε όλα τα στάδια, από τις μετρήσεις στη θάλασσα μέχρι και τη σύνθεση αυτής της εργασίας, την συμπαράσταση και την άψογη συνεργασία όπου απαιτήθηκε. Ειδικά ευχαριστώ, τον Ξενοφών Φραντζή για την αμέριστη υποστήριξη, τη συμπαράσταση, τη βοήθεια που μου προσέφερε και το χρόνο που μου διέθεσε, τον Αχιλλέα Τριπολιτσιώτη για την άψογη και με πολύ χιούμορ συνεργασία του και τον Αντώνη Δασκαλάκη για την βοήθειά του με τον δικό του μοναδικό τρόπο στα πολύπλοκα θέματα βαθμονόμησης δορυφόρων αλτιμετρίας.

--- Περιεχόμενα ---

Περίληψη	III
Περίληψη στην Αγγλική Γλώσσα – Abstract	v
Πρόλογος	VII
Περιεχόμενα	VIII
Κατάλογος Εικόνων	XII
Κατάλογος Γραφημάτων	XV
Κατάλογος Πινάκων	XVII
Πίνακας Συμβόλων	XIX
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	1
1.1. Εισαγωγή στη Δορυφορική Αλτιμετρία	1
1.2. Σταθμοί Βαθμονόμησης Αλτιμετρίας	2
1.3. Αξιοπιστία Μοντέλου Γεωειδούς και Αλτιμετρία	3
1.4. Βασικές Αρχές Ελέγχου Ακρίβειας Μοντέλου Γεωειδούς	4
Κεφάλαιο 2. Επιφάνειες Αναφοράς – Βασικά Μεγέθη	6
2.1. Ελλειψοειδές Αναφοράς	6
2.2. Γεωδαιτικές Συντεταγμένες	9
2.3. Συστήματα και Πλαίσια Αναφοράς Συντεταγμένων	10
2.4. Μέση Στάθμη της Θάλασσας	14
2.5. Γεωειδές	15
2.6. Περιορισμοί που αφορούν στο μοντέλο του γεωειδούς	18
2.7. Παγκόσμιο μοντέλο Γεωειδούς EGM96	19
2.8. Παγκόσμιο μοντέλο Γεωειδούς EGM08	20
2.9. Τοπογραφία της επιφάνειας της θάλασσας	21
Κεφάλαιο 3. Δορυφορική Αλτιμετρία	22
3.1. Ιστορική αναδρομή και μέλλον της Δορυφορικής Αλτιμετ	ρίας22
3.1.1. Από την αρχαιότητα στην διαστημική εποχή	22
3.1.2. Η εποχή της διαστημικής γεωδαισίας	
3.1.3. Η Έλευση της Δορυφορικής Αλτιμετρίας	25
3.1.4. Το μέλλον της επιχειρησιακής αλτιμετρίας	27

3.2. Βασικές Αρχές Αλτιμετρίας28			
3.2.1. Εισαγωγή			
3.2.2. Αρχή Λειτουργίας Αλτιμετρίας			
3.3. Διαστημικές Αποστολές – Δορυφόροι Αλτιμετρίας			
3.4. Χρησιμότητα			
3.4.1. Γεωδαισία και Γεωφυσική39			
Βαθυμετρία39			
Γεωδαισία40			
Τσουνάμι40			
3.4.2. Ωκεάνια Κυκλοφορία και οι Παραλλαγές της			
Μεγάλης κλίμακας ωκεάνια ρεύματα41			
Μέσης Κλίμακας Θαλάσσια Ρεύματα42			
Επιχειρησιακή ωκεανογραφία42			
Παλίρροιες42			
Φαινόμενο Θερμοκηπίου42			
Εποχές44			
3.4.3. Πάγος 44			
Παγετώνες45			
Θαλάσσιος Πάγος46			
3.4.4. Κλίμα			
El Niño - La Niña47			
Ταλάντωση του Βόρειου Ατλαντικού (North Atlantic Oscillation – NAO)			
Δεκαετείς Ταλαντώσεις49			
Το Δίπολο του Ινδικού Ωκεανού (Indian Ocean Dipole – IOD)49			
Εποχές49			
3.4.5. Ατμόσφαιρα, Άνεμοι και Κύματα50			
Άνεμοι και Κύματα51			
Τυφώνες51			
Βροχή51			
3.4.6. Υδρολογία και Έδαφος51			
Λίμνες και Κλειστές Θάλασσες52			
Στεριά52			
Ποτάμια53			
3.4.7. Παράκτιες Εφαρμογές53			
3.4.8. Βιολογία 55			

Αλτιμετρία και Φυτοπλαγκτόν	55
Θαλάσσια Θηλαστικά	55
Κεφάλαιο 4Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (GPS)	56
4.1. Βασικές Αρχές Λειτουργίας GPS	56
4.2. Μέθοδοι προσδιορισμού θέσης με GPS	62
4.2.1. Απόλυτος Προσδιορισμός Θέσης	62
4.2.2. Σχετικός Προσδιορισμός Θέσης	63
Σχετικός Στατικός Εντοπισμός	63
Κινηματικός Εντοπισμός	64
Εντοπισμός με Μέθοδο Στάσης και Αναχώρησης (stop & go)	64
Εντοπισμός σε Πραγματικό Χρόνο	64
Κεφάλαιο 5Βαθμονόμηση / Επικύρωση Μετρήσεων Αλτιμετρίας (CAL/VAL).	66
5.1. Εισαγωγή	66
5.2. Απόλυτη και σχετική Βαθμονόμηση	67
5.3. Μεθοδολογία Βαθμονόμησης / Επικύρωσης (CAL/VAL)	69
Κεφάλαιο 6Πραγματοποίηση Μετρήσεων στη Θαλάσσια Περιοχή της Γαύδο	ου .74
6.1. Προγραμματισμός Μετρήσεων	74
6.2. Εξοπλισμός που Χρησιμοποιήθηκε	75
6.2.1. Υποδομές Βαθμονόμησης στην Κρήτη	75
6.2.2. Δέκτες GPS	77
6.2.3. Παλιρροιογράφοι	78
6.2.4. Λοιπός Εξοπλισμός	79
6.3. Εγκατάσταση των οργάνων μέτρησης στο σκάφος	80
6.4. Πραγματοποίηση Μετρήσεων	82
Κεφάλαιο 7. Επεξεργασία των Μετρήσεων	86
7.1. Υπολογισμός Συντεταγμένων των Σταθμών Αναφοράς	86
7.2. Επεξεργασία μετρήσεων Κινηματικού GPS	93
7.2.1. Επεξεργασία 1 ^{ης} Περιόδου Μετρήσεων	94
7.2.2. Επεξεργασία 2 ^{ης} Περιόδου Μετρήσεων	97
7.2.3. Επεξεργασία 3 ^{ης} Περιόδου Μετρήσεων	100
7.3. Επεξεργασία μετρήσεων Παλιρροιογράφου KVR3	102
7.4. Υπολογισμός Ύψους Στάθμης Θάλασσας SSH	105
7.5. Μετατροπή SSH στο ελλειψοειδές αναφοράς του Jason-2	106
7.6. Πραγματοποίηση υπολογισμών	107

7.7. Δημιουργία Γραφημάτων SSH, N, και SSH-N	
7.8. Σύγκριση καμπύλης SSH με καμπύλη τοπικού μοντα 121	έλου γεωειδούς
7.9. Στατιστική Επεξεργασία	
Κεφάλαιο 8. Συμπεράσματα - Προτάσεις124	
8.1. Συμπεράσματα	
8.2. Προτάσεις	126
Βιβλιογραφία	128

---- Κατάλογος Εικόνων ----

Εικόνα 2.1 Τρισδιάστατο Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς Συντεταγμένων6
Εικόνα 2.2 Ταχύτητες Μετακίνησης Σταθμών Πλαισίου Αναφοράς ITRF200513
Εικόνα 2.3 Μέση στάθμη της Θάλασσας (CLS)14
Εικόνα 2.4 Διαφορές ανάμεσα στο μοντέλο Γεωειδούς EGM96 με Ελλειψοειδές αναφοράς WGS8416
Εικόνα 2.5 Σχηματική αναπαράσταση της σχέσης του γεωειδούς με το ελλειψοειδές αναφοράς16
Εικόνα 2.6 Ορθομετρικό υψόμετρο Η και γεωμετρικό υψόμετρο h17
Εικόνα 2.7 30'x30' τιμές των κυματισμών του γεωειδούς EGM96 για 360°x360°. Η εικόνα δείχνει προβολή Robinson για τη Γη. Τιμές Γεωειδούς από Ν. Pavlis (RITSS/NASA GSFC), και εικόνα από (NASA GSFC)19
Εικόνα 2.8 Ύψη Γεωειδούς EGM2008 με ανάλυση 2,5' (NGA – National Geospatial- Intelligence Agency)20
Εικόνα 2.9 Τοπογραφία της Θαλάσσιας Επιφάνειας (MDT)21
Εικόνα 3.1 Πρώτη χαρτογράφηση του Gulf Stream το 177723
Εικόνα 3.2 Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας της αλτιμετρίας28
Εικόνα 3.3 Δορυφόρος Jason-2 και όργανα λειτουργίας του (Cnes, CLS)
Εικόνα 3.4 Δορυφόροι Αλτιμετρίας <i>(CNES, CLS)</i> 32
Εικόνα 3.5 Αποτύπωση των τροχιών του δορυφόρου Jason-2 στην επιφάνεια της Γης (Ground Track)36
Εικόνα 3.6 Τροχιές 018 και 109 των δορυφόρων αλτιμετρίας, πάνω από τις Ν. Γαύδος και Κρήτη37
Εικόνα 3.7 Βαθυμετρικός Χάρτης Ν. Γαύδου38

Εικόνα 3.8 Ωκεάνια Ρεύματα όπως προκύπτους από επεξεργασία δεδομένων	
αλτιμετίας (Δυναμική Τοπογραφία - Dynamic Topography)	
(http://woce.nodc.noaa.gov/)41	
Εικόνα 3.9 Μεταβολή της Μέσης Στάθμης της Θάλασσας (MSL) από Οκτώβριο του	
1992 έως Μάρτιο του 2010 σε mm/έτος <i>(CNES, LEGOS, CLS)</i> 43	
Εικόνα 3.10 Τοπογραφικός Χάρτης Ανταρκτικής <i>(CNES)</i> 45	
Εικόνα 3.11 Αναπαράσταση της εξέλιξης του φαινομένου El Niño σε La Niña από το	
Σεπ. 2009 έως σήμερα, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα αλτιμετρίας του	
δορυφόρου Jason-2 (NASA)48	
Εικόνα 3.12 Περιοχές Κάλυψης των δορυφόρων Jason-1 και Jason-2 στη Μεσόγειο.	
Με πράσινα τα τμήματα των τροχιών που συμπεριλαμβάνονται στις	
μετρήσεις για περαιτέρω επεξεργασία, ενώ με κόκκινο αυτά που	
αποκλείονται λόγω της θέσης τους κοντά στις ακτές <i>(CNES, 2009)</i> 54	
Εικόνα 4.1 Δύο από τους Δορυφόρους GPS – Αριστερά Block II-Α και Δεξιά Block II-F	
(NASA)56	
Εικόνα 4.2 Αστερισμός GPS - Navstar Constellation: GPS Block IIA, IIR/M, IIF57	
Εικόνα 4.3 Τα τρία τμήματα του GPS58	
Εικόνα 4.4 Απόλυτος προσδιορισμόs θέσης με GPS62	
Εικόνα 4.5 Σχετικός Στατικός Προσδιορισμός με GPS63	
Εικόνα 4.6 Διαφορικός Εντοπισμός με GPS για ναυσιπλοΐα65	
Εικόνα 5.1 Σημαντήρας GPS (GPS Buoy) στην θαλάσσια περιοχή κοντά στο	
Πολυτεχνείο Κρήτης σε πειραματικές δοκιμές του Εργαστηρίου	
GeoMatLab68	
Εικόνα 5.2 Μεθοδολογία βαθμονόμησης / επικύρωσης μετρήσεων Αλτιμετρίας69	
Εικόνα 5.3 Μεθοδολογία Βαθμονόμησης Δεδομένων Αλτιμετρίας (αντίγραφο του	
Εικόνα 5.2)	

Εικόνα 6.1 Μόνιμο Δίκτυο GNSS και Τροχιές Δορυφόρων Αλτιμετρίας πάνω από
Κρήτη και Γαύδο76
Εικόνα 6.2 Μόνιμος Εξοπλισμός των σταθμών βάσης GVD7 και GVD8, με δέκτες
Leica GPS1200+ series και κεραίες AR25 και AX1202GG77
Εικόνα 6.3 Μετεωρολογικός σταθμός Paroscientific MET479
Εικόνα 6.4 Θέση εγκατάστασης σταθμών στο λιμάνι του Καραβέ στη Γαύδο80
Εικόνα 6.5 Εγκατάσταση δέκτη GPS και παλιρροιογράφου στο σκάφος81
Εικόνα 6.6 Σχηματική αναπαράσταση (τομή) της εγκατάστασης των οργάνων στο
σκάφος, και μέτρηση διαφοράς ύψους σημείου μέτρησης του GPS με
σημείο μέτρησης παλιρροιογράφου82
Εικόνα 6.7 Εκκίνηση από τα Σφακιά με προορισμό το λιμάνι του Καραβέ στη Γαύδο,
την 09 Σεπτεμβρίου 2010 7:24am83
Εικόνα 6.8 Πορεία που ακολουθήθηκε κατά τις ημέρες μετρήσεων στη θαλάσσια
περιοχή της Γαύδου84
Εικόνα 7.1 Περί του Προγράμματος GNSS Solutions90
Εικόνα 7.2 Περί του Προγράμματος Matlab91
Εικόνα 7.3 1 ^η περίοδος μετρήσεων την 18 Σεπ. 2009 Βορειοανατολικά της Ν.
Γαύδου94
Εικόνα 7.4 2 ^η Περίοδος Μετρήσεων την 27 Αυγούστου του 2010 Νοτιοανατολικά
της Ν. Γαύδου97
Εικόνα 7.5 3 ^η Περίοδος Μετρήσεων την 07 Σεπτεμβρίου του 2010100
Εικόνα 7.6 Υπολογισμός Ύψους Στάθμης Θάλασσας SSH106
Εικόνα 8.1 Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου επίδρασης της βαθυμετρίας στο
μοντέλο του γεωειδούς127

---- Κατάλογος Γραφημάτων ----

Γράφημα 3.1 Χρονοδιάγραμμα αποστολών δορυφόρων αλτιμετρίας
Γράφημα 3.2 Γραφική απεικόνιση της βελτίωσης της ακρίβειας μέτρησης ύψους και
τροχιάς των τελευταίων αποστολών δορυφόρων αλτιμετρίας35
Γράφημα 3.3 Ακρίβεια τροχιάς δορυφόρων αλτιμετρίας ως προς τη μεταβλητότητα
των Ωκεανών <i>(CNES)</i> 36
Γράφημα 3.4 Μεταβολή της Μέσης Στάθμης της Θάλασσας με την πάροδο των
ετών, όπως προκύπτει από τα δεδομένα αλτιμετρίας των δορυφόρων
Topex/Poseidon, Jason-1 και Jason-2 <i>(CNES, LEGOS, CLS)</i> 43
Γράφημα 7.1 Γεωγραφικό Πλάτος συναρτήσει Γεωγραφικού Μήκους στο Βόρειο
Τμήμα της τροχιάς Νο 10996
Γράφημα 7.2 Γεωγραφικό Πλάτος συναρτήσει Γεωγραφικού Μήκους στο Νότιο
Τμήμα της τροχιάς Νο 01899
Γράφημα 7.3 Γεωγραφικό Πλάτος συναρτήσει Γεωγραφικού Μήκους στο Νότιο
Τμήμα της τροχιάς Νο 109102
Γράφημα 7.4 Διακύμανση της στάθμης της θάλασσας όπως καταγράφηκε από τον
παλιρροιογράφο KVR3, από 16 Μαΐου 2009 έως και 02 Νοεμβρίου 2010
Γράφημα 7.5 Μετρήσεις Ύψους Στάθμης της Θάλασσας στο λιμάνι του Καραβέ, από
τον Παλιρροιογράφου KVR3104
Γράφημα 7.6 Απόσταση από το σταθμό αναφοράς συναρτήσει του SSH113
Γράφημα 7.7 Γεωγραφικό Πλάτος φ συναρτήσει των (SSH & N & SSH-N)113
Γράφημα 7.8 Γεωγραφικό Πλάτος φ συναρτήσει των (πολυώνυμο SSH & N & SSH-N)
Γράφημα 7.9 Απόσταση από το σταθμό αναφοράς συναρτήσει του SSH115
Γράφημα 7.10 Γεωγραφικό Πλάτος φ συναρτήσει των (SSH & N & SSH-N)

ράφημα 7.11 Γεωγραφικό Πλάτος φ συναρτήσει των (πολυώνυμο SSH & N & SSH-
N)116
ράφημα 7.12 Απόσταση από το σταθμό αναφοράς συναρτήσει του SSH117
ράφημα 7.13 Γεωγραφικό Πλάτος φ συναρτήσει των (SSH & N & SSH-N)117
ράφημα 7.14 Γεωγραφικό Πλάτος φ συναρτήσει των (πολυώνυμο SSH & N & SSH-
N)
ράφημα 7.15 Γεωγραφικό Πλάτος φ συναρτήσει των (SSH & N & SSH-N)118
ράφημα 7.16 Γεωγραφικό Πλάτος φ συναρτήσει των (πολυώνυμο SSH & N & SSH-
N)119
ράφημα 7.17 Γεωγραφικό Πλάτος φ συναρτήσει των (SSH & N & SSH-N)119
ράφημα 7.18 Γεωγραφικό Πλάτος φ συναρτήσει των (πολυώνυμο SSH & N & SSH-
N)120
ράφημα 7.19 Συνοπτική παρουσίαση σύγκρισης διαφοράς SSH-N για όλες τις
περιόδους μετρήσεων122

--- Κατάλογος Πινάκων ---

Πίνακας 2.1 Παράμετροι Ελλειψοειδών εκ Περιστροφής8
Πίνακας 3.1 Βασικά χαρακτηριστικά της τροχιάς του Δορυφόρου Jason-234
Πίνακας 3.2 Εξέλιξη των αποστολών δορυφόρων αλτιμετρίας ως προς την ακρίβεια μέτρησης και τροχιάς τους35
Πίνακας 5.1 Σχέσεις υπολογισμού σφάλματος αλτιμέτρου
Πίνακας 6.1 Μόνιμα Εγκατεστημένα GPS των σταθμών GVD7 και GVD8 στη Γαύδο77
Πίνακας 6.2 Μόνιμα Εγκατεστημένοι Παλιρροιογράφοι στο λιμάνι του Καραβέ της Γαύδου78
Πίνακας 7.1 Υπολογισμός συντεταγμένων και στατιστικά επεξεργασίας του GVD0 στο πλαίσιο αναφοράς ITRF200587
Πίνακας 7.2 Αρχικές Συντεταγμένες GVD0 και Ταχύτητες Μετακίνησης ως προς το Πλαίσιο ITRF200587
Πίνακας 7.3 Χρόνοι αναφοράς για το ITRF2005 και το GPS88
Πίνακας 7.4 Συντεταγμένες Σημείου GVD0 τις ημερομηνίες των μετρήσεων89
Πίνακας 7.5 Συντεταγμένες Σταθμών Αναφοράς την 18 Σεπ. 200991
Πίνακας 7.6 Συντεταγμένες Σταθμών Αναφοράς την 27 Αυγ. 2010 και 07 Σεπ. 2010 92
Πίνακας 7.7 Αποτελέσματα Κινηματικού GPS της 18 Σεπ. 2009 στο ίχνος της τροχιάς No 10995
Πίνακας 7.8 Αποτελέσματα Κινηματικού GPS της 27 Αυγ. 2010 στο ίχνος της τροχιάς No 01898
Πίνακας 7.9 Αποτελέσματα Κινηματικού GPS της 09 Σεπ. 2010 στο ίχνος της τροχιάς No 109

Πίνακας 7.10 Παράμετροι ελλειψοειδών WGS84 και ελλειψοειδούς τροχιάς Jason-2
Πίνακας 7.11 Υπολογισμός SSH-N για το Βορειοανατολικό τμήμα της τροχιάς Νο 109
Πίνακας 7.12 Υπολογισμός SSH-N για το Νοτιοανατολικό τμήμα της τροχιάς Νο 018
Πίνακας 7.13 Υπολογισμός SSH-N για το Νοτιοδυτικό τμήμα της τροχιάς No 109 .111
Πίνακας 7.14 Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων SSH-N

--- Πίνακας Συμβόλων ---

DTM	Digital Terrain Model	Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους
LSC	Least Squares Collocation	Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων
MSS	Mean Sea Surface	Μέση Στάθμη Επιφάνειας τη Θάλασσας
MDT	Mean Dynamic Topography	Μέση Τοπογραφία της Επιφάνειας της Θάλασσας
GDRs	Geophysical Data Records (GDRs)	Γεωφυσικά Δεδομένα
SSB	Sea State Bias	Διακύμανση της Επιφάνειας της Θάλασσας
SLA	Sea Level Anomaly	Ανωμαλία Στάθμης Θάλασσας
SSH	Sea Surface Height	Ύψος Στάθμης Θάλασσας
стѕ	Conventional Terrestrial System, CTS	Συμβατικό Επίγειο Σύστημα
ICRS	International Celestial Reference System	Διεθνές Ουράνιο Σύστημα Αναφοράς
ICRF	International Celestial Reference Frame	Διεθνές Ουράνιο Πλαίσιο Αναφοράς
MSS	Mean Sea Surface	Μέση Επιφάνεια Θάλασσας
MSL	Mean Sea Level	Μέση Στάθμη Επιφάνειας της Θάλασσας
CLS	Collecte Localisation Satellites	Γαλλική Εταιρεία Διαστημικών Ερευνών
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales	Εθνικό Κέντρο Διαστημικών Ερευνών Γαλλίας
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration	Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμόσφαιρας Η.Π.Α.
NASA	National Aeronautics and Space Administration	Εθνική Υπηρεσία Αεροναυτικής και Διαστήματος Η.Π.Α.
СТР	Conventional Terrestrial Pole	Συμβατικός Γήινος Πόλος

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1.Εισαγωγή στη Δορυφορική Αλτιμετρία

Αλτιμετρία είναι τεχνική μέτρησης ύψους της στάθμης της θάλασσας. Για αυτό το σκοπό, αναπτύχθηκε μια τεχνική μέσω δορυφόρων, οι οποίοι έχουν τεθεί σε τροχιά γύρω από τη Γη κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να παρέχουν παγκόσμια κάλυψη ανά τακτά χρονικά διαστήματα μερικών ημερών.

Η μέτρηση του ύψους της στάθμης της θάλασσας, επιτυγχάνεται μέσω της ακριβής μέτρησης της απόστασης δορυφόρου – επιφάνειας της θάλασσας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ειδικών συσκευών που είναι εγκατεστημένες στους δορυφόρους αλτιμετρίας, και ονομάζονται αλτίμετρα. Τα αλτίμετρα διαθέτουν συσκευές radar, που εκπέμπουν υψίσυχνους παλμούς προς την επιφάνεια της Γης. Μετρώντας με ακρίβεια το χρόνο διάδοσης του σήματος από το δορυφόρο στη Γη και μετά από ανάκλασή του από αυτή έως τη στιγμή λήψης του πάλι στο δορυφόρο, υπολογίζεται η απόσταση δορυφόρου – επιφάνειας της θάλασσας.

Η ακρίβεια μέτρησης αυτής της απόστασης, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, με κυριότερη την επίδραση της ατμόσφαιρας στη διάδοση του κύματος του radar. Ο έλεγχος της ακρίβειας αυτής της μέτρησης, με δεδομένο το γεγονός ότι η θέση του δορυφόρου είναι απόλυτα γνωστή μέσω συστημάτων GPS (Global Positioning System), Doris και Laser, εξαρτάται από την επαλήθευση αυτής της μέτρησης από επίγεια συστήματα, στα οποία βασική παράμετρος στους υπολογισμούς, είναι το ύψος του γεωειδούς πάνω από το ελλειψοειδές αναφοράς του δορυφόρου.

1.2. Σταθμοί Βαθμονόμησης Αλτιμετρίας

Η βαθμονόμηση των δορυφόρων αλτιμετρίας και η επικύρωση των μετρήσεών τους, πραγματοποιείται από τέσσερις σταθμούς σε όλον τον πλανήτη.

- Ο πρώτος βρίσκεται στην Κορσική της Γαλλίας και λειτουργεί από την CNES (CNES)
- Ο δεύτερος στην πλατφόρμα πετρελαίου του Χάρβεστ στην Καλιφόρνια και λειτουργεί υπό το Jet Propulsion Laboratory της NASA (NASA, JPL (Jet Propulsion Laboratory), California Institute of Technology)
- Ο τρίτος στην Τασμανία της Αυστραλίας και λειτουργεί υπό το Πανεπιστήμιο της Τασμανίας
- Και ο τέταρτος βρίσκεται στην Ελλάδα, στη Ν. Γαύδο Νότια της Ν.
 Κρήτης και έχει δημιουργηθεί και λειτουργεί από το Εργαστήριο Γεωδαισίας και Γεωπληροφορικής των Γεωεπιστημών του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Η νήσος Γαύδος, είναι το Νοτιότερο σημείο της Ευρώπης (εκτός Κύπρου), και βρίσκεται στο Νότιο όριο της Ευρασιατικής πλάκας και ειδικά της μικροπλάκας του Αιγαίου. Απέχει 35Km από τα Νότια παράλια της Κρήτης, και εκτός από την άκρως ενδιαφέρουσα γεωγραφική θέση της από άποψη τεκτονικών πλακών, τυχαίνει, πάνω από αυτή, να διασταυρώνονται δύο τροχιές δορυφόρων αλτιμετρίας (*Εικόνα 3.6*). Πρόκειται για την κατιούσα και την ανιούσα τροχιά των δορυφόρων Jason-1 και Jason-2. Κατιούσα, όταν ο δορυφόρος διέρχεται από τα βόρεια της Ελλάδας, περνάει πάνω από την Καλαμάτα, το Καστέλι της Κισάμου της Κρήτης και τέλος περνά πάνω από τη Γαύδο, και ανιούσα, όταν μετά από πέντε ημέρες, ο ίδιος δορυφόρος, περνά και πάλι πάνω από το ίδιο σημείο της Γαύδου, μετά πάνω από το Ρέθυμνο και συνεχίζει προς Τουρκία. Στο σταθμό της Ν. Γαύδου, έχει εγκατασταθεί μόνιμος ειδικός εξοπλισμός, όπως σταθμοί GPS, παλιρροιογράφοι και συστήματα υποστήριξής τους και επικοινωνίας για την ανάκτηση των δεδομένων καταγραφής τους.

Έτσι, μας δίνεται η δυνατότητα, να πραγματοποιήσουμε βαθμονόμηση δορυφόρων αλτιμετρίας, από σταθμό που βρίσκεται κάτω από τη διασταύρωση δύο δορυφορικών τροχιών.

1.3.Αξιοπιστία Μοντέλου Γεωειδούς και Αλτιμετρία

Το γεωειδές, είναι μοντέλο ισοδυναμικής επιφάνειας, που προσομοιώνει το σχήμα και μέγεθος της Γης, πλησιάζει την μέση στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας, εκτείνεται και κάτω από τις ηπείρους, και στην επιφάνειά του το βαρυτικό πεδίο της Γης είναι σταθερό. Τέτοια μοντέλα γεωειδούς έχουν δημιουργηθεί για ολόκληρη την επιφάνεια της Γης, ενώ έχουν δημιουργηθεί και τοπικά μοντέλα σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο για ειδικούς σκοπούς. Αυτό ακριβώς συμβαίνει και στην περιοχή της Ν. Γαύδου νότια της Ν. Κρήτης.

Το πρόβλημα που προκύπτει, είναι ότι το υφιστάμενο μοντέλο γεωειδούς που θα εξετάσουμε, εμφανίζεται να έχει πολύ μεγάλη χωρική διακριτική ικανότητα (ο κάνναβος των σημείων που σχηματίζει το μοντέλο απέχουν μερικά χιλιόμετρα μεταξύ τους). Έτσι, σε εφαρμογές όπου απαιτείται ακρίβεια μερικών εκατοστών όπως η βαθμονόμηση δορυφόρων αλτιμετρίας, είναι επιβεβλημένος ο έλεγχος της αξιοπιστίας του μοντέλου του γεωειδούς.

Ο έλεγχος αυτός της αξιοπιστίας του μοντέλου, πραγματοποιείται με μετρήσεις της στάθμης της θάλασσας με χρήση κινηματικού GPS, πάνω από ειδικά διαμορφωμένο πλωτό μέσο, πάνω στο ίχνος της τροχιάς του δορυφόρου αλτιμετρίας.

Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται το ύψος της στάθμης της θάλασσας ως προς το ελλειψοειδές αναφοράς του GPS (WGS84). Εφ' όσον το γεωειδές προσεγγίζει τη μέση στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας, θα πρέπει η τομή του γεωειδούς κατά τη διαδρομή που ακολουθείται στο κινηματικό GPS, να έχει ίδια κλίση (ή τάση) με την καμπύλη του υπολογιζόμενου ύψους της στάθμης της θάλασσας.

1.4.Βασικές Αρχές Ελέγχου Ακρίβειας Μοντέλου Γεωειδούς

Οι μετρήσεις για την πραγματοποίηση βαθμονόμησης δορυφόρων αλτιμετρίας, ενδείκνυται να πραγματοποιούνται σε απόσταση μεγαλύτερη των 20Km από την ακτή, ώστε να μην υπάρχουν αλλοιώσεις και παρεμβολές στο ανακλώμενο σήμα του radar που λαμβάνει ο δορυφόρος από τη στεριά.

Η πραγματοποίηση της βαθμονόμησης, απαιτεί γνώση και μελέτη των ελλειψοειδών και των μοντέλων γεωειδούς που χρησιμοποιούνται, και ειδικά των μοντέλων γεωειδούς που έχουν δημιουργηθεί για την περιοχή της Γαύδου, χρήση κινηματικού GPS, αλλά και κυρίως, γνώση του τρόπου λειτουργίας της αλτιμετρίας.

Η ακριβής μέτρηση του ύψους της στάθμης της θάλασσας, είναι πρωταρχικό δεδομένο για χρήση σε διάφορες επιστήμες, όπως η Γεωδαισία και η Γεωφυσική, ή ακόμη στη μελέτη διαφόρων φαινομένων που διαμορφώνουν τη ζωή στον πλανήτη μας, όπως οι κλιματολογικές αλλαγές και το λιώσιμο των πάγων.

Η μεθοδολογία του ελέγχου της αξιοπιστίας του γεωειδούς, περιλαμβάνει το πειραματικό τμήμα πραγματοποίησης των μετρήσεων και στη συνέχεια την επεξεργασία τους για τον υπολογισμό του ύψους της στάθμης της θάλασσας και την σύγκρισή της με το ύψος του γεωειδούς στην περιοχή.

Για το πειραματικό μέρος του ελέγχου, πραγματοποιήθηκε κινηματικό GPS πάνω στο ίχνος των τροχιών του δορυφόρου Jason-2 πάνω σε πλωτό μέσο, στη θαλάσσια περιοχή της Γαύδου, με ταυτόχρονη καταγραφή της στάθμης της θάλασσας από παλιρροιογράφους πάνω στο πλωτό μέσο και στο σταθμό της Γαύδου. Η επεξεργασία των μετρήσεων, οδηγεί στον υπολογισμό του ύψους της στάθμης της θάλασσας πάνω στο ίχνος των τροχιών του δορυφόρου Jason-2. Στη συνέχεια η σύγκριση του με τα ύψη του μοντέλου του γεωειδούς στην περιοχή, θα οδηγήσει σε χρήσιμα συμπεράσματα, ώστε τελικά να επιτευχθεί ακριβέστερη βαθμονόμηση των μετρήσεων των δορυφόρων αλτιμετρίας.

Κεφάλαιο 2. Επιφάνειες Αναφοράς – Βασικά Μεγέθη

2.1.Ελλειψοειδές Αναφοράς

Το ελλειψοειδές αναφοράς, είναι μια μαθηματικά οριζόμενη επιφάνεια αναφοράς, που προσεγγίζει το σχήμα της Γης και που ουσιαστικά είναι μια σφαίρα πεπλατυσμένη στους πόλους. Πρόκειται για τον ορισμό του μη σφαιρικού σχήματος της Γης, ως ενός ελλειψοειδούς εκ περιστροφής.



Εικόνα 2.1 Τρισδιάστατο Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς Συντεταγμένων

Για ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής, που δημιουργείται από την περιστροφή μιας έλλειψης γύρω από τον μικρό ημιάξονα της, η εξίσωσή του είναι (2.1):

$$\frac{X^2 + Y^2}{a^2} + \frac{Z^2}{b^2} = 1 \tag{2.1}$$

Το σύστημα συντεταγμένων βάση του οποίου ορίζεται η τριάδα των αριθμών (Χ,Υ,Ζ) ορίζεται ως το Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (Μετρίκας, 2009). Η θέση του κέντρου του ορίζεται ως το κέντρο της μάζας της Γης, και ο άξονας ΟΖ ταυτίζεται με τον άξονα περιστροφής της Γης. Ο άξονας περιστροφής της Γης, μετακινείται ελαφρώς σε σχέση με το στερεό φλοιό της, ως αποτέλεσμα της κίνησης του πόλου. Έτσι, πρόσφατα ορίστηκε η έννοια του Πόλου Αναφοράς, και η νέα υιοθετημένη θέση του, αναφέρεται ως Συμβατικός Γήινος Πόλος (Conventional Terrestrial Pole – CTP). Οι άξονες ΟΧ και ΟΥ του συστήματος συντεταγμένων, είναι κάθετοι στον άξονα ΟΖ, με τον άξονα ΟΧ να διέρχεται από τον μηδενικό μεσημβρινό του Greenwich και το επίπεδο του Γήινου Ισημερινού. Ένα τέτοιο σύστημα αναφοράς συντεταγμένων που ορίζεται με τον παραπάνω τρόπο, ονομάζεται Συμβατικό Γήινο Σύστημα Αναφοράς (Conventional Terrestrial System, CTS).

Για ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής, που αναφέρεται στο σύστημα CTS, ορίζουμε τις ακόλουθες παραμέτρους:

Eπιπλάτυνση **f**:
$$f \equiv \frac{a-b}{a}$$
 (2.2)

Κύρια Εκκεντρότητα
$$e$$
: $e \equiv \frac{\varepsilon}{a} = \frac{\sqrt{\alpha^2 - b^2}}{a}$ (2.3)

Δευτερεύουσα Εκκεντρότητα
$$e'$$
: $e' \equiv \frac{\varepsilon}{b} = \frac{\sqrt{\alpha^2 - b^2}}{b}$ (2.4)

Μετά από πράξεις, οι σχέσεις που συνδέουν τους ημιάξονες του ελλειψοειδούς εκ περιστροφής με τις παραμέτρους που προαναφέρθηκαν, δίνονται από την σχέση (2.5):

$$\frac{b}{a} = 1 - f = \sqrt{1 - e^2} = \frac{1}{\sqrt{1 - e'^2}}$$
(2.5)

Οι παράμετροι μερικών ελλειψοειδών εκ περιστροφής από αυτά που χρησιμοποιούνται σήμερα, δίνονται στον *Πίνακα 2.1*. Στην διπλωματική αυτή εργασία, χρησιμοποιούνται το WGS84 που είναι το ελλειψοειδές αναφοράς του δορυφορικού συστήματος εντοπισμού του GPS, και το κοινό ελλειψοειδές αναφοράς των δορυφόρων αλτιμετίας Topex/Poseidon, Jason-1 και Jason-2.

Ονομασία Ελλειψοειδούς	Μεγάλος Ημιάξονας α (m) Semi-Major Axis	Επιπλάτυνση f Flattening Coefficient
Bessel	6 377 397,155	1/299,1528128
Hayford	6 378 388	1/297
NAD 83	6 378 137	1/293,465
European 1950	6 378 388	1/297
WGS72	6 378 135	1/298,25999
WGS84	6 378 136,6	1/297,25642
International 1924	6 378 388	1/298,247
GRS 1980	6 378 137	1/298,2572236
Jason-2 reference ellipsoid	6 378 136,3	1/298,257

Πίνακας 2.1 Παράμετροι Ελλειψοειδών εκ Περιστροφής

2.2.Γεωδαιτικές Συντεταγμένες

Ενώ οι καρτεσιανές συντεταγμένες (*X, Y, Z*) είναι πολύ βολικές στους υπολογισμούς μας, πάραυτα δεν είναι συνηθισμένες στους κύκλους των χαρτογράφων και των ναυτικών. Ήταν παράδοση ακόμη και από τον 3[°] αιώνα π. Χ., να εκφράζονται οι θέσεις πάνω στη γήινη επιφάνεια χρησιμοποιώντας γωνιακές ή σφαιρικές συντεταγμένες (πλάτος *Φ* και μήκος *Λ*) παρά τις καρτεσιανές συντεταγμένες.

Μέχρι και τον Νεύτωνα, οι συντεταγμένες καθορίζονταν με την παραδοχή ότι η Γη ήταν σφαιρική. Όμως, για καλύτερη ακρίβεια θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν το ελλειψοειδές σχήμα της Γης. Έτσι οι σφαιρικές συντεταγμένες, (Φ, Λ), αντικαθίστανται από τις ελλειψοειδείς ή γεωδαιτικές συντεταγμένες (φ, λ), οι οποίες, για ένα σημείο τυχαίο Ρ, σύμφωνα με την Εικόνα 2.1, ορίζονται ως εξής:

Το *γεωδαιτικό πλάτος φ*, είναι η γωνία της καθέτου από το σημείο P στην επιφάνεια του ελλειψοειδούς εκ περιστροφής με το επίπεδο του ισημερινού.

Το γεωγραφικό μήκος λ, ορίζεται ως η δίεδρη γωνία μεταξύ του μεσημβρινού αναφοράς (π.χ. Greenwich) και του μεσημβρινού που διέρχεται από το σημείο *P*.

Οι συντεταγμένες (*φ*, *λ*) ορίζουν ένα σημείο *Q* στην επιφάνεια του ελλειψοειδούς. Για να καθοριστεί όμως ένα σημείο *P* πάνω στη Γήινη επιφάνεια, απαιτείται και ο ορισμός μια τρίτης συντεταγμένης, του υψομέτρου του σημείου *P* πάνω από την επιφάνεια του ελλειψοειδούς. Το υψόμετρο αυτό συμβολίζεται με *h*, ονομάζεται γεωμετρικό υψόμετρο, και μετριέται κατά μήκος της καθέτου *n* μεταξύ του ελλειψοειδούς και του σημείου *P*.

Κατά συνέπεια, η θέση του σημείου *P* σε γεωδαιτικές συντεταγμένες, ορίζεται πλήρως από την τριάδα των αριθμών *φ, λ, h*.

2.3.Συστήματα και Πλαίσια Αναφοράς Συντεταγμένων

Η ανάλυση γεωδαιτικών πειραματικών δεδομένων που προκύπτουν από διαφορετικές μετρήσεις και τεχνικές, απαιτεί σύγκριση αποτελεσμάτων. Είναι επομένως επιβεβλημένο να οριστεί ένα γεωδαιτικό πλαίσιο μέσα στο ποίο θα πρέπει να αναφέρονται όλα τα δεδομένα και οι τεχνικές, ώστε να είναι συγκρίσιμες. Το πλαίσιο αυτό ονομάζεται σύστημα αναφοράς. Τα συστήματα αναφοράς, υιοθετήθηκαν και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές της Αστρονομίας, της Γεωδαισίας και της Γεωφυσικής.

Μαζί με τα συστήματα αναφοράς (reference systems), ορίστηκαν και τα πλαίσια αναφοράς (reference frames) με τη μεταξύ τους λεπτή διαφορά, να έγκειται στο γεγονός ότι:

Στο σύστημα αναφοράς, εξετάζεται η θεωρητική έννοια του όρου, και περιλαμβάνει τη θεωρία και τις παγκόσμιες φυσικές ή αστρονομικές σταθερές και παραμέτρους.

Το πλαίσιο αναφοράς, αποτελεί την πρακτική εφαρμογή του όρου «σύστημα αναφοράς» και περιλαμβάνει τις μετρήσεις και το σύνολο των συντεταγμένων των γεωδαιτικών σταθμών ή και των αστρονομικών σημείων αναφοράς, που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση ενός συστήματος αναφοράς.

Αστεροσκοπεία και μόνιμοι γεωδαιτικοί σταθμοί που συλλέγουν γεωδαιτικές μετρήσει συνεχώς για τη θέση τους, και αποτελούν σταθερά σημεία αναφοράς πάνω στην επιφάνεια της Γης, ορίζοντας ένα πολύεδρο στο χώρο. Οι κορυφές αυτού του πολυέδρου παρέχουν μια πρώτη προσέγγιση του σχήματος του φλοιού της Γης, καθώς και του συστήματος αναφοράς.

Για το ορισμό της θέσης τους, χρησιμοποιούμε δύο συστήματα αναφοράς.

Το πρώτο θεωρούμε ότι είναι ακίνητο σε σχέση με σταθερούς αστέρες και ονομάζεται *αδρανειακό σύστημα (inertial system)*, ενώ ονομάζεται *σύστημα του*

Κοπέρνικου όταν είναι ηλιοκεντρικό και *σύστημα του Γαλιλαίου*¹ όταν είναι γεωκεντρικό.

Το δεύτερο σύστημα περιστρέφεται με τη γωνιακή ταχύτητα της Γης, άρα είναι ακίνητο σε σχέση με το στερεό φλοιό της, και ονομάζεται γήινο σύστημα (terrestrial system).

Τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς συνδέονται με τα γήινα, με μαθηματικές σχέσεις, οι οποίες είναι συναρτήσεις των τριών γωνιών στροφής. Επιπλέον όμως, οι γωνίες στροφής περιέχουν με τη σειρά τους μια τέταρτη παράμετρο, τον *χρόνο*. Επομένως για να μεταβούμε από ένα αδρανειακό σύστημα σε ένα γήινο σύστημα αναφοράς ή αντιστρόφως, απαιτείται να προσδιορίσουμε, εκτός από τον προσανατολισμό του ενός ως προς το άλλο (γωνίες στροφής), και το χρόνο (χρονική στιγμή) κατά τον οποίο επιθυμούμε την μετατροπή.

Επειδή είναι αδύνατον να ορίσουμε ένα αδρανειακό σύστημα με την απόλυτη έννοια του όρου, ορίζουμε αρχικά μια πρώτη προσέγγισή του που είναι το ψευδο-αδρανειακό. Έτσι, σε κάθε ψευδο-αδρανειακό σύστημα, ορίζουμε και το χρόνο προσδιορισμού του.

Η Διεθνής Ένωση Γεωδαισίας (International Union of Geodesy), έχει υιοθετήσει τη *θεμελιώδη εποχή αναφοράς* (*epoch*), ως σημείο αναφοράς του χρόνου και αντιστοιχεί στο μεσημέρι της 1^{ης} Ιανουαρίου του 2000. Η αφετηρία αυτή συμβολίζεται με J2000.0².

Το διεθνές ηλιοκεντρικό ουράνιο σύστημα αναφοράς **ICRS** (International Celestial Reference System) και το αντίστοιχο διεθνές πλαίσιο αναφοράς **ICRF** (International Celestial Reference Frame), ορίστηκαν από την Διεθνή Ένωση Αστρονομίας, ισχύουν από την 1^{η} Ιανουαρίου του 1998, και ο χρόνος T_0 =J2000.0 έχει οριστεί ως η θεμελιώδης εποχή αναφοράς των ουρανίων συστημάτων.

¹ Η θεμελιώδης αρχή της σχετικότητας του Γαλιλαίου, θεωρεί ότι οι ιδιότητες του χώρου και του χρόνου διατηρούνται, και οι νόμοι της Μηχανικής εφαρμόζονται σε όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς.

² Το .0, αντιστοιχεί στην χρονική στιγμή 0% (μεσημέρι της $1^{n\varsigma} / 1^{ou}$) του έτους 2000

Η σύνδεση του διεθνές πλαισίου αναφοράς ICRS με τα επίγεια συστήματα αναφοράς, γίνεται μέσω του γήινου συστήματος αναφοράς ITRS (International Terrestrial Reference System), το οποίο έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Είναι γεωκεντρικό, δηλαδή η αρχή των αξόνων του συμπίπτει με το κέντρο μάζας της Γης. Στη μάζα της Γης συμπεριλαμβάνεται η μάζα των θαλασσών και της ατμόσφαιρας.
- Η κλίμακά του³, δηλαδή η μονάδα μέτρησης μήκους, είναι το μέτρο
 (m) όπως αυτό ορίζεται στο σύστημα SI.
- Η αρχή του χρόνου είναι η χρονική στιγμή 1984.0
- Η διαχρονική μεταβολή στον προσανατολισμό του δεν δημιουργεί
 καμιά περιστροφή σε σχέση με το στερεό φλοιό της Γης.

Το γήινο πλαίσιο αναφοράς ITRF, υλοποιείται με τις καρτεσιανές συντεταγμένες (Χ, Υ, Ζ) ενός δικτύου γεωδαιτικών και αστρονομικών σταθμών, που καλύπτουν θέσεις σε ολόκληρη την υδρόγειο. Οι συντεταγμένες αυτές προκύπτουν από γεωδαιτικές μετρήσεις.

Το πλαίσιο αυτό, συμβολίζεται ως *ITRF-yy*. Τα σύμβολα "-yy" είναι αριθμοί που αντιστοιχούν στο τελευταίο ημερολογιακό έτος τα δεδομένου του οποίου χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του συγκεκριμένου ITRF. Για παράδειγμα, το ITRF97 αναφέρεται στις συντεταγμένες και τις ταχύτητες μετακίνησης των γεωδαιτικών σταθμών όπως προσδιορίστηκαν το 1998 με τα στοιχεία και τις μετρήσεις μέχρι και το έτος 1997. Από το έτος 2000 και μετά, ο συμβολισμός άλλαξε και χρησιμοποιήθηκε ο συμβολισμός **ITRFyyyy**, όπου τα σύμβολα "γγγγ" αναφέρονται σε ολόκληρο το όνομα του τελευταίου έτους του οποίου τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του.

Στο πλαίσιο αναφοράς ITRF, δίνονται τα διανύσματα μετακίνησης των σταθμών αναφοράς, έτσι ώστε η συνισταμένη κίνηση όλων να ισούται με το μηδέν.

³ Εκτός από τους άξονες του συστήματος ITRS και τη διεύθυνσή τους, απαιτείται και η παράμετρος που καθορίζει την κλίμακα (συντελεστής διαστολής) του γήινου συστήματος και είναι μονάδα μέτρησης μήκους (αποστάσεων)



Εικόνα 2.2 Ταχύτητες Μετακίνησης Σταθμών Πλαισίου Αναφοράς ITRF2005

Στην παρούσα μελέτη, θα χρησιμοποιηθεί το *ITRF2005 (Εικόνα 2.2)* ως πλαίσιο αναφοράς των σταθμών αναφοράς GNSS (Global Navigation Satellite Systems) που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων του κινηματικού GPS, για τους οποίους ορίζεται η θέση και η ταχύτητα μετακίνησης τους, ώστε με αυτό το δεδομένο να μπορούν να υπολογιστούν οι νέες συντεταγμένες τους για τις ημέρες διεξαγωγής των μετρήσεων.

2.4.Μέση Στάθμη της Θάλασσας

Αντί για τη σημερινή διακριτή αναπαράσταση του σχήματος της Γης, θα ήταν προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί μια συνεχής μαθηματική σχέση που να καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της Γήινης επιφάνειας και να μην περιορίζεται μόνο στο στερεό τμήμα της. Μια τέτοια αναπαράσταση του σχήματος και του μεγέθους της Γης θα μπορούσε να αποδοθεί από την προσεγγιστική προσαρμογή κάποιας συνεχούς επιφάνειας στη θαλάσσια επιφάνεια. Η συνεχής αυτή επιφάνεια θα αντιπροσωπεύει και το σχήμα και μέγεθός της τουλάχιστον για το 72% της επιφάνειάς της που καλύπτεται από θάλασσα.



Εικόνα 2.3 Μέση στάθμη της Θάλασσας (CLS)

Φυσικά κάποιος αντιλαμβάνεται ότι η στιγμιαία επιφάνεια της θάλασσας είναι πάρα πού ασταθής σε σχέση με την ξηρά. Μεταβάλλεται συνεχώς με το χρόνο από την επίδραση των κυμάτων, των ανέμων, των παλιρροιών, των ωκεάνιων ρευμάτων και αρκετών ακόμη παραγόντων. Αυτό όμως δεν ισχύει και για τη μέση στάθμη της θάλασσας.

Ενώ οι παρατηρήσεις της στιγμιαίας στάθμης της θάλασσας δείχνουν ότι μπορεί να μεταβάλλεται μέχρι και 20m κατά τη διάρκεια της ημέρας, οι μέσοι όροι δεν μεταβάλλονται και πολύ. Για παράδειγμα η μέση στάθμη της θάλασσας κατά τη διάρκεια μηνών, δεν μεταβάλλεται πάνω από μερικά δέκατα του μέτρου (dm) και οι ετήσιοι μέσοι όροι στη διάρκεια δεκαετιών δεν μεταβάλλονται περισσότερο από 10cm. Το γεγονός αυτό έδωσε αφορμή για την επιλογή της μέσης στάθμης της θάλασσας, ως της επιφάνειας που αποδίδει το σχήμα και το μέγεθος της Γης.

Η Μέση Στάθμη της Θάλασσας (*MΣΘ – Mean Sea Surface - MSS*) καθορίζεται από τις καταγραφές της στιγμιαίας στάθμης της θάλασσας σε ένα σύνολο σημείων που βρίσκονται στις ακτογραμμές. Στα σημεία αυτά, είναι εγκατεστημένα όργανα καταγραφής της στιγμιαίας στάθμης της θάλασσας που ονομάζονται παλιρροιογράφοι. Τέτοια χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία καταγραφής της διακύμανσης της στάθμης της θάλασσας στη Ν. Γαύδο.

2.5.Γεωειδές

Στην πραγματικότητα, η ΜΣΘ, ορίζει μια επιφάνεια, πάνω στην οποία το δυναμικό της βαρύτητας είναι σταθερό. Πράγματι, αν θεωρήσουμε ότι οι μάζες των υδάτων των ωκεανών μετακινούνταν ελεύθερα ως ένα ομοιογενές υλικό, που υπόκεινται μόνο στην επίδραση των δυνάμεων της βαρύτητας της Γης, τότε τη στιγμή που θα επέλθει ισορροπία, η επιφάνεια που ορίζεται αποτελεί μια ισοδυναμική επιφάνεια.

Έτσι όταν μιλάμε για το σχήμα και το μέγεθος της Γης, εκείνο που στην ουσία εννοούμε, είναι το σχήμα της ισοδυναμικής επιφάνειας της Γης, που προσεγγίζει καλύτερα τη μέση στάθμη της θάλασσας. Η ισοδυναμική αυτή επιφάνεια που προσεγγίζει τη Μέση Στάθμη της Θάλασσας, και που υποτίθεται ότι εκτείνεται και κάτω από τις ηπείρους, ονομάζεται *Γεωειδές*.

Ενώ το ελλειψοειδές είναι μια ομαλή επιφάνεια που ορίζεται μαθηματικά, το γεωειδές είναι μια επιφάνεια (Εικόνα 2.5), που αντιστοιχεί όχι στην πραγματική επιφάνεια της Γης, αλλά σε μια επιφάνεια, η οποία μπορεί να προσδιοριστεί μόνο μέσω εντατικών βαρυτικών μετρήσεων και υπολογισμών, και απεικονίζει τις μεταβολές του πεδίου βαρύτητας της Γης.







Εικόνα 2.5 Σχηματική αναπαράσταση της σχέσης του γεωειδούς με το ελλειψοειδές αναφοράς.

Η διαφορά μεταξύ του γεωειδούς και του ελλειψοειδούς ονομάζεται υψόμετρο του γεωειδούς **N**, και μετριέται από το ελλειψοειδές μέχρι το γεωειδές (Εικόνα 2.6). Το υψόμετρο ενός σημείου πάνω από το γεωειδές ονομάζεται ορθομετρικό υψόμετρο και συμβολίζεται με (**H**), ενώ το υψόμετρο από το ελλειψοειδές ονομάζεται γεωμετρικό υψόμετρο (**h**).



Εικόνα 2.6 Ορθομετρικό υψόμετρο Η και γεωμετρικό υψόμετρο h

Έτσι, μεταξύ τους ισχύει η σχέση:

$$\boldsymbol{h} \cong \boldsymbol{H} + \boldsymbol{N} \tag{2.6}$$

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου το ύψος του γεωειδούς (**N**) είναι αρνητικό, που σημαίνει ότι το γεωειδές βρίσκεται κάτω από το ελλειψοειδές.

Παρά το γεγονός ότι το γεωειδές είναι μια σημαντική έννοια για περίπου διακόσια χρόνια στην ιστορία της γεωδαισίας και η γεωφυσικής, άρχιζε να καθορίζεται με υψηλή ακρίβεια μόνο κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Συχνά χαρακτηρίζεται ως το πραγματικό φυσικό σχήμα της γης, σε αντίθεση με το ιδεατό γεωμετρικό σχήμα αναφοράς που είναι το ελλειψοειδές εκ περιστροφής.
2.6.Περιορισμοί που αφορούν στο μοντέλο του γεωειδούς

Το σύστημα GPS, μετράει γεωμετρικά υψόμετρα (υψόμετρα από το ελλειψοειδές αναφοράς του που είναι το WGS84). Τα γεωμετρικά υψόμετρα για να μετατραπούν σε ορθομετρικά, πρέπει να υπάρχει ακριβής γνώση του υψομέτρου του γεωειδούς **N**, όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο.

Σε μερικές περιοχές της γης, το μόνο διαθέσιμο μοντέλο γεωειδούς, είναι ένα παγκόσμιο γεωδαιτικό μοντέλο και όχι τοπικό. Ένα παγκόσμιο γεωδαιτικό μοντέλο γεωειδούς, υπολογίζεται σαν σειρά σφαιρικών αρμονικών συντελεστών πλήρως ανεπτυγμένους, σε κάποιο μέγιστο βαθμό και τάξη. Πολλά σύγχρονα παγκόσμια μοντέλα γεωειδούς χρησιμοποιούν συναρτήσεις που φτάνουν σε μέγιστο βαθμό και τάξη των 360. Το μοντέλο αυτό συχνά παίρνει την μορφή καννάβου, όπου οι κορυφές του αντιστοιχούν σε υψόμετρα του γεωειδούς *N*, πάνω στα οποία εφαρμόζεται μια μέθοδος παρεμβολής, ανάλογα με τις ανάγκες των χρηστών, για την εύρεση των σημείων εκτός καννάβου. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να επιλύσουν την συμπεριφορά της επιφάνειας του γεωειδούς, ανά 55Km περίπου. Με τέτοια χωρική ανάλυση, ακόμα και στα καλύτερα μοντέλα γεωειδούς, όπως είναι το EGM96 που θα δούμε στην επόμενη παράγραφο, η απόλυτη ακρίβεια και σχετική ακρίβεια που μπορούν να παρέχουν, κυμαίνεται στο ένα μέτρο ή σε αρκετά εκατοστά του μέτρου αντίστοιχα.

Στην περίπτωση της περιοχής της Ν. Γαύδου, η ακρίβεια αυτή δεν μας αρκεί.

2.7.Παγκόσμιο μοντέλο Γεωειδούς EGM96

Το **EGM96** (Earth Geopotential Model 1996) είναι ένα γεωδυναμικό μοντέλο της Γης, που δημιουργήθηκε από τη συνεργασία της Εθνικής Χαρτογραφικής Υπηρεσίας των Η.Π.Α (NIMA, National Imagery and Mapping Agency), της NASA και του Πανεπιστημίου του Οχάιο.



Εικόνα 2.7 30'x30' τιμές των κυματισμών του γεωειδούς EGM96 για 360°x360°. Η εικόνα δείχνει προβολή Robinson για τη Γη. Τιμές Γεωειδούς από Ν. Pavlis (RITSS/NASA GSFC), και εικόνα από (NASA GSFC)

Συνίσταται από ένα σύνολο ομαλοποιημένων συντελεστών σφαιρικών αρμονικών συναρτήσεων του πεδίου βαρύτητας της Γης (γεωδυναμικό), πλήρεις στο βαθμό (n) και τη τάξη (m) 360. Οι εν λόγω σφαιρικοί αρμονικοί συντελεστές χρησιμοποιούνται σε αριθμητικούς αλγορίθμους (αριθμοσειρές) ή αλγορίθμους FFT (μετασχηματισμοί Fourier), για να υπολογίσουν τις ακόλουθες βαρυμετρικές ποσότητες σε σημεία της γήινης επιφάνειας:

- ανωμαλίες της βαρύτητας (Δg)
- υψόμετρα του γεωειδούς (N)
- συνιστώσες (ξ) και (η) της απόκλισης της κατακορύφου, που εκφράζουν τη συνολική εκτροπή της κατακορύφου
- διαταραχές της βαρύτητας (*δg*)

του διαταρακτικού δυναμικού (Τα) και των δεύτερων παραγώγων
 του.

Σημειώνεται επίσης, ότι είναι δυνατόν να υπολογιστούν μέσες τιμές των ανωμαλιών βαρύτητας από τους συντελεστές του μοντέλου EGM96.

2.8.Παγκόσμιο μοντέλο Γεωειδούς EGM08

Τον Ιανουάριο του 2008, ανακοινώθηκε η διάθεση ενός νέου μοντέλου γεωειδούς της Γης από την Εθνική Υπηρεσία Γεωστατιστικών Πληροφοριών της Αμερικής, το **EGM08**, (Εικόνα 2.8), και είναι αναμφισβήτητα μία από της μεγαλύτερες υπερβάσεις στον χώρο της χαρτογράφησης του βαρυτικού πεδίου της γης, σε παγκόσμια κλίμακα.



Εικόνα 2.8 Ύψη Γεωειδούς EGM2008 με ανάλυση 2,5' (NGA – National Geospatial-Intelligence Agency)

Για πρώτη φορά, είναι διαθέσιμο ένα μοντέλο που συνίσταται από ένα σύνολο ομαλοποιημένων συντελεστών σφαιρικών αρμονικών συναρτήσεων του πεδίου βαρύτητας της Γης (γεωδυναμικό), που φτάνει να είναι πλήρεις στο βαθμό (n) και τη τάξη (m) 2159 (με πρόσθετους σφαιρικούς αρμονικούς συντελεστές να φτάνουν 2190 σε βαθμό και 2159 σε τάξη). Καλύπτει όλη την υφήλιο και η ανάλυσή του (περίπου 9Km) είναι κατά πολύ υψηλότερη από το προηγούμενο μοντέλο EGM96 (55Km). Αυτό το επαναστατικό βήμα συνεισφέρει με τον πιο επιτυχημένο τρόπο στις συνεχείς προσπάθειες της γεωδαιτικής κοινότητας τα τελευταία χρόνια, για τον προσδιορισμό ενός βελτιωμένου, υψηλής ανάλυσης βαρυτικού μοντέλου της Γης.

2.9.Τοπογραφία της επιφάνειας της θάλασσας

Η μέση στάθμη της επιφάνειας των ωκεανών, δεν είναι μια τέλεια ισοδυναμική επιφάνεια, ακόμη και αν γίνει συνόρθωση των μετρήσεων για τις επιδράσεις των κυμάτων και των παλιρροιών. Οι επικρατούντες άνεμοι, η μορφή των ακτογραμμών, τα ρεύματα και οι μεταβολές στη θερμοκρασία και στην αλατότητα, προκαλούν μια διαφορά που φτάνει ακόμη και το 1m από την αντίστοιχη ισοδυναμική επιφάνεια του γεωειδούς. Η απόκλιση αυτή ονομάζεται *Τοπογραφία της Θαλάσσιας Επιφάνειας (Ocean Surface Topography ή Dynamic Sea Surface Topography*).

Η μέση επιφάνεια της θάλασσας πάνω από το γεωειδές, διορθωμένη από γεωφυσικές παραμέτρους, ορίζεται σαν Μέση Τοπογραφία της Επιφάνειας της Θάλασσας (Mean Dynamic Topography – MDT).



Κεφάλαιο 3. Δορυφορική Αλτιμετρία

3.1.Ιστορική αναδρομή και μέλλον της Δορυφορικής Αλτιμετρίας

3.1.1.Από την αρχαιότητα στην διαστημική εποχή

Οι άνθρωποι από τα πολύ παλιά χρόνια αισθάνονταν αμήχανοι και ανίσχυροι εμπρός στον ωκεανό. Οι πρώτοι που ασχολήθηκαν με την κατεύθυνση και τη ταχύτητα των ρευμάτων ήταν οι έμποροι στη Μεσόγειο και την Ερυθρά Θάλασσα. Οι Βίκινγκς διέσχισαν τον Βόρειο Ατλαντικό γύρω στο 1000μ.Χ., αλλά μόνο κατά την Αναγέννηση (1400-1600μ.Χ.) Πορτογαλικές, Ισπανικές, Βρετανικές και Γαλλικές αποστολές ξεκίνησαν συστηματικά την εξερεύνηση των θαλασσών και να καταλαβαίνουν την πραγματική εικόνα του πλανήτη.

Το 1777, για πρώτη φορά, ο Franklin Benjamin (Εικόνα 3.1), για να συντομέψει το ταξίδι από την Νέα Υόρκη στο Λονδίνο, κατέγραψε τα ρεύματα του Ατλαντικού. Χαρτογράφησε το Ρεύμα του Κόλπου (Gulf Stream) μετρώντας τη θερμοκρασία του νερού. Ο Franklin συνιστούσε στους καπετάνιους που μετέφεραν αλληλογραφία να ακολουθούν το Gulf Stream για να κερδίζουν χρόνο.

Κεφάλαιο 3. Δορυφορική Αλτιμετρία

3.1 Ιστορική αναδρομή και μέλλον της Δορυφορικής Αλτιμετρίας



Εικόνα 3.1 Πρώτη χαρτογράφηση του Gulf Stream το 1777

To 1849, o Matthew Maury, έκδωσε τον πρώτο παγκόσμιο χάρτη ανέμων και ρευμάτων, χρησιμοποιώντας δεδομένα που είχαν καταγραφεί από πλοία.

Το 1872, διεξήχθη το πρώτο αμιγώς ωκεανογραφικό πείραμα: επί 42 μήνες, η εκστρατεία με το όνομα Challenger εξερεύνησε συστηματικά τους ωκεανούς, συλλέγοντας δεδομένα από την επιφάνεια της θάλασσας έως το βυθό, όπως βαθυμετρία, θερμοκρασία και δεδομένα ρευμάτων. Αυτές οι πληροφορίες έθεσαν τις βάσεις για την σημερινή ωκεανογραφία.

Η έλευση συστημάτων βασιζόμενων στους δορυφόρους, που μπορούσαν να προσφέρουν προσδιορισμό θέσης και συλλογή δεδομένων ακόμη και από πολύ μακριά, έκαναν τους επιστήμονες να αρχίσουν να σκέφτονται παγκόσμια για το θέμα της ωκεανογραφίας.

Σε διάφορες αποστολές με αεροπλάνα, χρησιμοποιήθηκαν όργανα καταγραφής της θερμοκρασίας, συγκέντρωσης της χλωροφύλλης και ταχύτητας

ανέμου στην επιφάνεια της Γης. Αλλά η επανάσταση στις ωκεανογραφικές παρατηρήσεις, ήταν η δορυφορική αλτιμετρία με radar.

Η παγκόσμια παρατήρηση για την κατανόηση ωκεανογραφικών φαινομένων έγινε πραγματικότητα. Ο ρόλος των ωκεανών τόσο στο παρελθόν όσο και στο παρόν και το μέλλον, είναι καθοριστικός στις κλιματικές αλλαγές.

Και στο μέλλον, έχοντας στη διάθεσή μας συνεχή καταγραφή του ύψους της στάθμης της θάλασσας, και νεότερη αναπτυγμένη τεχνολογία, θα είμαστε σε θέση να προβλέψουμε ακριβέστερα και την κατάλληλη στιγμή, φαινόμενα που θα μας επηρεάσουν.

3.1.2.Η εποχή της διαστημικής γεωδαισίας

Σε παγκόσμια κλίμακα, το 1957, η Γη θεωρείται ακόμη ένας άγνωστος πλανήτης. Το κενό γνώσης καλείται να καλύψει η δημιουργία του Διεθνούς Γεωφυσικού Έτους (International Geophysical Year - AGY) το 1957-1958. Στόχος του είναι η μέτρηση των βασικών παραμέτρων που διέπουν τη γεωμετρία της Γης, και η παρατήρηση βασικών φαινομένων.

Το 1957, είναι επίσης το έτος του πρώτου τεχνητού δορυφόρου. Του Sputnik. Πέραν των πολιτικών προβλημάτων στρατηγικής κατά την εκτόξευσή του, έδειξε ένα καινούριο τρόπο εξερεύνησης: Το διάστημα.

Μια αρχική φάση εξερεύνησης ξεκινά τη δεκαετία του '60, όταν γεωδαιτικοί δορυφόροι μετρούν την πρώτη τροχιά που είχε υπολογιστεί από μετρήσεις εξ' αποστάσεως με τηλεμετρία laser. Αυτός ο υπολογισμός των παραμέτρων της τροχιάς, σύντομα θα επιβεβαιωθεί με τη χρήση του φαινομένου Doppler (Παράγραφος 3.2.2)

3.1.3.Η Έλευση της Δορυφορικής Αλτιμετρίας

Η ανάγκη δημιουργίας μια καινούριας μεθόδου, της διαστημικής ωκεανογραφίας με τη βοήθεια συσκευών radar, συζητήθηκε για πρώτη φορά στο συνέδριο του Williamstown το 1969.

Τότε, η διαστημική αλτιμετρία είχε σχεδιαστεί για τη μέτρηση της στάθμης της θάλασσας, από το συνδυασμό μιας μεθόδου με radar και μιας μεθόδου προσδιορισμού θέσης. Το radar μετρούσε την απόσταση από το δορυφόρο έως μια επιφάνεια ανάκλασης και με τη μέθοδο προσδιορισμού θέσης υπολογιζόταν με μεγάλη ακρίβεια η θέση του δορυφόρου στην τροχιά του.

Οι πρώτες μετρήσεις αλτιμετίας επέτρεψαν τον καθορισμό της τοπογραφίας της επιφάνειας του ωκεανού. Η πρώτη χώρα που εκτόξευσε δορυφορικό αλτίμετρο, ήταν η Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, με τον SeaSat το 1978 και τον GeoSat το 1985. Η Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA – European Space Agency) εκτόξευσε το 1991 τους ERS-1 και 2 (European Remote Sensing Satellite), εφοδιασμένους με διάφορα όργανα μετρήσεων, συμπεριλαμβανομένου και του αλτιμέτρου radar.

Το 1981, η Γαλλική CNES (*Centre National d'Etudes Spatiales*) σχεδίαζε τον πρώτο δορυφόρο αποκλειστικά αλτιμετρίας, τον Poseidon. Την ίδια εποχή, η NASA (National Aeronautics and Space Administration), η οποία ήθελε να επισπευτεί η επίτευξη του προγράμματος των Seasat, σχεδίαζε τον TOPEX (*Topography Experiment*). Όμως, ούτε η CNES ούτε η NASA είχαν την απαιτούμενη χρηματοδότηση για τέτοιου είδους αποστολή η καθεμιά ξεχωριστά. Έτσι, το 1983, ξεκίνησαν οι συζητήσεις για την πιθανότητα να συνδυαστούν τα δύο προγράμματα.

Το 1987, η CNES και η NASA, δημιούργησαν επίσημα μια εταιρική σχέση για τη συνένωση των δύο προγραμμάτων, δημιουργώντας έναν Αμερικάνικο δορυφόρο με Αμερικάνικα και Γαλλικά όργανα, ο οποίος θα εκτοξευόταν με έναν Ευρωπαϊκό πύραυλο (Ariane 4), και θα ονομαζόταν TopEx/Poseidon. Εκτοξεύτηκε τελικά τον Αύγουστο του 1992. Η βασική αποστολή του TopEx/Poseidon, ήταν η παγκόσμια ωκεανογραφία. Χαρακτηριστικό του όγκου της πληροφορίας που παρείχε, είναι ότι σε λιγότερο από δέκα (10) ημέρες, παρείχε παγκόσμια κάλυψη, με πολύ περισσότερα δεδομένα από επιτόπου παρατηρήσεις των τελευταίων εκατό (100) ετών. Η αυξανόμενη ποιότητα των δεδομένων (μετά από επεξεργασία των αρχικών μετρήσεών του), η συνέχεια των δεδομένων και η ομοιογένεια τους για πάνω από 13 χρόνια και η συνεργασία του επιστημονικού τεχνικού και ανθρώπινου δυναμικού, έστεψαν με επιτυχία την αποστολή.

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του Topex/Poseidon, οι CNES και NASA, πραγματοποίησαν και άλλες δορυφορικές αποστολές, όπως το Δεκέμβριο του 2001 τον Jason-1, και τον Ιούνιο του 2008 τον Jason-2 ενώ, υπάρχουν και σχέδια για μελλοντικούς δορυφόρους εφοδιασμένους με όργανα μεγαλύτερης ακρίβειας με την εξέλιξη της τεχνολογίας. Σήμερα είναι επιχειρησιακά ενεργοί οι Jason-1 και Jason-2, με τους οποίους θα ασχοληθούμε σε επόμενη παράγραφο.

3.1.4.Το μέλλον της επιχειρησιακής αλτιμετρίας

Όλο και ταχύτερα συστήματα επεξεργασίας δεδομένων, επιτρέπουν στην αλτιμετρία να λειτουργεί σχεδόν σε πραγματικό χρόνο (near real-time). Η δημιουργία μοντέλων, σε συνδυασμό με άλλα δεδομένα που συλλέγουμε στη Γη, όπως η θερμοκρασία και η αλμυρότητα του νερού, βοηθούν στην λειτουργικότητα της αλτιμετρίας. Έτσι, για πρώτη φορά, την 17 Ιανουαρίου του 2001, η Mercator Ocean έκδωσε το πρώτο δελτίο για τον Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό.

Ύστερα από 15 χρόνια προόδου της αλτιμετρίας, είναι απαραίτητο να συνεχίσουμε την καταγραφή και να εξασφαλίσουμε επαρκή χωρική ανάλυση για εφαρμογές μέσης κλίμακας και λειτουργικές εφαρμογές. Για το σκοπό αυτό, τουλάχιστον δύο δορυφόροι αλτιμετρίας απαιτούνται, ενώ για ειδικότερες εφαρμογές μικρότερης χωρικής ανάλυσης απαιτούνται τρείς η τέσσερεις δορυφόροι αλτιμετρίας σε λειτουργία.

Με την υπάρχουσα δομή σήμερα λοιπόν, νέα δεδομένα καταγράφονται κάθε μέρα, τα θέματα προς εξέταση διαφοροποιούνται, όπως για παράδειγμα η παρατήρηση της μεταβολής της στάθμης των ποταμών και των λιμνών, ή η συμβολή της αλτιμετρίας στον προσδιορισμό του πάχους του πάγου στη θάλασσα, ή ακόμη και η παράκτια αλτιμετρία.

3.2.Βασικές Αρχές Αλτιμετρίας

3.2.1. Εισαγωγή

Η βασική αρχή της λειτουργίας των δορυφόρων αλτιμετρίας είναι η μέτρηση της απόστασης από τον δορυφόρο στην επιφάνεια της Γης *(Εικόνα 3.2)*. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ειδικού αλτιμέτρου.



Εικόνα 3.2 Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας της αλτιμετρίας

Το αλτίμετρο διαθέτει radar που εκπέμπει σήματα υψηλής συχνότητας (πάνω από 1700 παλμούς το δευτερόλεπτο) προς τη Γη *(Εικόνα 3.3)*. Στη συνέχεια, μετρώντας με μεγάλη ακρίβεια το χρόνο που απαιτείται από τη στιγμή εκπομπής του ηλεκτρομαγνητικού παλμού του radar μέχρι και την εκ νέου λήψη του μετά από ανάκλασή του στη επιφάνεια της Γης, μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσταση Δορυφόρου – Επιφάνειας Γης.



Εικόνα 3.3 Δορυφόρος Jason-2 και όργανα λειτουργίας του (Cnes, CLS)

Η μέτρηση της απόστασης δεν είναι η μοναδική παράμετρος που μπορούμε να προσδιορίσουμε, αφού τα χαρακτηριστικά (πλάτος – κυματομορφή) του ανακλώμενου σήματος εμπεριέχουν και άλλες πληροφορίες σχετικά με την επιφάνεια που προκάλεσε την ανάκλαση.

Έτσι, το καλύτερο αποτέλεσμα στην μέτρηση της απόστασης το παίρνουμε όταν η ανάκλαση γίνεται από ομοιογενείς επιφάνειες, όπως για παράδειγμα οι ωκεανοί, που αποτελούν και το κύριο θέμα ενδιαφέροντος, ενώ τα κύματα ανταποκρίνονται σε γνωστά στατιστικά μοντέλα και δεν μπορούν να αποτελέσουν εμπόδιο στη μελέτη της αλτιμετρίας. Επιφάνειες που δεν είναι ομοιογενείς, περιέχουν ασυνέχειες και παρουσιάζουν σημαντικές κλίσεις, όπως περιοχές πάγου, ποτάμια ή διάφορες περιοχές της στεριάς, κάνουν τη σωστή ερμηνεία του ανακλώμενου κύματος πολύ δυσκολότερη.

3.2.2.Αρχή Λειτουργίας Αλτιμετρίας

Το αρχικά μετρούμενο μέγεθος, όπως έχει ήδη προαναφερθεί, είναι ο χρόνος που χρειάζεται το σήμα radar για να ταξιδέψει από το δορυφόρο έως την επιφάνεια της Γης, και μετά από ανάκλασή του στην επιφάνειά της, να επιστρέψει στο δορυφόρο.

Το ζητούμενο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας, ορίζεται ως το ύψος της από το ελλειψοειδές αναφοράς, και που στο εξής θα αποκαλούμε **SSH** (*Sea Surface Height*).

Το SSH λοιπόν, από την αλτιμετρία, προκύπτει ως η διαφορά ανάμεσα στη θέση (ύψος) του δορυφόρου στην τροχιά του ως προς το ελλειψοειδές αναφοράς του **H** και της μετρούμενης απόστασης δορυφόρου – επιφάνειας **R** (Σχέση (3.1)).

$$SSH = H - R \tag{3.1}$$

Η υπολογιζόμενη απόσταση δορυφόρου – επιφάνειας της θάλασσας R, προκύπτει από τον μετρούμενο χρόνο μετάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος από το δορυφόρο στην επιφάνεια της θάλασσας και από την επιφάνεια ανακλώμενο πάλι στο δορυφόρο, πολλαπλασιασμένος με την ταχύτητα διάδοσής του (ταχύτητα φωτός C = 299.792.458 m/s) και διαιρεμένος διά δύο (Σχέση (3.2)).

$$R = C \cdot \frac{t}{2} \tag{3.2}$$

Για να έχουμε μετρήσεις ακρίβειας μερικών εκατοστών σε μια μετρούμενη απόσταση εκατοντάδων χιλιομέτρων (ύψος τροχιάς δορυφόρου αλτιμετρίας 1336Km), απαιτείται πάρα πολύ ακριβής γνώση της τροχιάς του δορυφόρου. Για αυτό το λόγο, συστήματα προσδιορισμού θέσης τοποθετούνται πάνω στο δορυφόρο.

Έτσι, το ύψος της τροχιάς του δορυφόρου αλτιμετρίας καθώς και η ακριβής θέση του, υπολογίζονται με πολύ μεγάλη ακρίβεια με τη βοήθεια τριών συστημάτων:

- Του συστήματος DORIS (Εικόνα 3.3).
- Του συστήματος GPS (Global Positioning System)
- Συστήματος μέτρησης αποστάσεων προς δορυφόρους με laser (satellite laser ranging, SLR).

Αφού εξασφαλιστεί η ακρίβεια προσδιορισμού της τροχιάς και της θέσης του δορυφόρου, πρέπει να εξασφαλιστεί και την ακρίβεια υπολογισμού του R. Οποιαδήποτε αλληλεπίδραση στην ταχύτητα διάδοσης του σήματος του radar πρέπει να ληφθεί υπ' όψη. Οι υδρατμοί και τα ηλεκτρόνια της ατμόσφαιρας, η ιονόσφαιρα και η τροπόσφαιρα, όπως και μια σειρά άλλων παραμέτρων, είναι δυνατόν να επηρεάσουν το χρόνο διάδοσης του σήματος και εξ' αυτού τη μέτρηση απόστασης.

Μπορούμε να κάνουμε διορθώσεις για όλες αυτές τις επιδράσεις πάνω στο σήμα του αλτιμέτρου, μετρώντας τες με ειδικό εξοπλισμό που διαθέτει ο δορυφόρος ή χρησιμοποιώντας διαφορετικές συχνότητες εκπομπής σήματος για σύγκριση των διαφορών χρόνων που προκύπτουν, καθώς διαφορετικές συχνότητες επηρεάζονται διαφορετικά από το μέσο στο οποίο ταξιδεύει το σήμα, ή ακόμη με μοντελοποίηση αυτών των παραμέτρων. Για όλους αυτούς τους λόγους, στην αλτιμετρία απαιτεί να ληφθούν υπόψη πάρα πολλές παράμετροι πριν χρησιμοποιήσουμε τα δεδομένα που μας δίνει.

Η επεξεργασία αυτών των δεδομένων, είναι και αυτή μέρος της αλτιμετρίας, παράγοντας αποτελέσματα διαβαθμισμένης ακρίβειας για διαφορετικές χρήσεις.



3.3.Διαστημικές Αποστολές – Δορυφόροι Αλτιμετρίας

Εικόνα 3.4 Δορυφόροι Αλτιμετρίας (CNES, CLS)

Στη δεκαετία του 1990, ο Topex/Poseidon, ήταν ο πρώτος δορυφόρος αλτιμετίας που διέθετε ακρίβεια αλτιμέτρου και τροχιάς που έκανε δυνατή την παρατήρηση και καταγραφή της διακύμανσης της στάθμης της θάλασσας.

Όπως φαίνεται στο Γράφημα 3.1, ακολούθησαν αρκετοί ακόμη, ενώ και άλλοι κατασκευάζονται και προγραμματίζονται ήδη για το μέλλον. Οι τρείς δορυφόροι, Topex/Poseidon, Jason-1 και Jason-2, με τους οποίους θα ασχοληθούμε στην παρούσα εργασία, ειδικά μετά την προσαρμογή της τροχιάς του Jason-1 τελικά την 20/09/2002, έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά τροχιάς, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η καλύτερη βαθμονόμηση των δορυφόρων, αλλά και η συνέχεια των μετρήσεων. Τα ειδικά χαρακτηριστικά της τροχιάς του δορυφόρου Jason-2, εμφανίζονται στον Πίνακα 3.1.

Κεφάλαιο 3. Δορυφορική Αλτιμετρία



3.3 Διαστημικές Αποστολές – Δορυφόροι Αλτιμετρίας

Γράφημα 3.1 Χρονοδιάγραμμα αποστολών δορυφόρων αλτιμετρίας

Η τροχιά του δορυφόρου, έχει περίοδο εννιά ημέρες και είκοσι δύο ώρες, ή με άλλα λόγια ο δορυφόρος περνά πάνω από το ίδιο σημείο της Γης (μέσα σε ένα εύρος ενός χιλιομέτρου) κάθε 10 ημέρες περίπου. Η περίοδος των 10 ημερών, είναι η καλύτερη επιλογή και συμβιβασμός μεταξύ χωρικής και χρονικής ανάλυσης, και σχεδιάστηκε έτσι για τη μελέτη μεγάλης κλίμακας μεταβλητότητας των ωκεανών.

Η λειτουργική περίοδος κάθε αποστολής, σχεδιάζεται αρχικά για να διαρκέσει μια πενταετία (π.χ. ERS-1 από Ιούλιο 1991 έως Ιούνιο του 1996), αν και μερικές αποστολές ήταν εξαιρετικά επιτυχείς και έφτασαν ακόμη και τα 10 χρόνια λειτουργίας, όπως η εξαιρετικά επιτυχής αποστολή του Topex/Poseidon και η Jason-1 (Γράφημα 3.1).

Βασικά Χαρακτηριστικά της τροχιάς του Δορυφόρου Jason-2		
Κύριος Ημιάξονας	7.714,4278 km	
Εκκεντρότητα	0,000095	
Κλίση τροχιάς	66,039°	
Ύψος τροχιάς	1.336,0 km	
Επανάληψη κύκλου	9,9151 ημέρες	
Περάσματα ανά κύκλο	254	
Ταχύτητα του δορυφόρου στην τροχιά	7,2 km/s	
Ταχύτητα ίχνους στην επιφάνεια της Γης	5,8 km/s	

3.3 Διαστημικές Αποστολές – Δορυφόροι Αλτιμετρίας

Πίνακας 3.1 Βασικά χαρακτηριστικά της τροχιάς του Δορυφόρου Jason-2

Το ύψος τροχιάς των δορυφόρων, το οποίο είναι 1.336Km, μειώνει τις επιδράσεις της ατμόσφαιρας και του πεδίου βαρύτητας στην κίνηση των δορυφόρων στο ελάχιστο, και επιπλέον κάνει τον προσδιορισμό της τροχιάς ευκολότερο και ακριβέστερο.

Οι παράμετροι της τροχιάς των δορυφόρων, έχουν την τάση να μεταβάλλονται στο χρόνο, σαν αποτέλεσμα κυρίως της επίδρασης της ατμόσφαιρας στην κίνησή τους. Πιο μακροπρόθεσμα, μικρότερες ή μεγαλύτερες μεταβολές μπορεί να δημιουργηθούν λόγω της αστάθειας του βαρυτικού πεδίου της Γης, της πίεσης της ακτινοβολίας του Ήλιου, καθώς και εξ αιτίας άλλων δυνάμεων από μικρότερα μαγνητικά πεδία.

Για τη λύση του προβλήματος μεταβολής της τροχιάς των δορυφόρων, εκτελούνται διορθωτικοί ελιγμοί μικρής διάρκειας και κυρίως όταν ο δορυφόρος βρίσκεται πάνω από περιοχές μειωμένου ενδιαφέροντος (όπως η ξηρά).

Παρακάτω, στον Πίνακα 3.2 και σχηματικά στο Γράφημα 3.2, δίνεται η εξέλιξη των δορυφόρων αλτιμετρίας, όσον αφορά την επιτευχθείσα ακρίβεια της τροχιάς τους και την ακρίβεια μέτρησης του αλτιμέτρου, ενώ στο Γράφημα 3.3 η ακρίβεια της τροχιάς ως προς τη μεταβλητότητα της στάθμης των ωκεανών.

Κεφάλαιο 3. Δορυφορική Αλτιμετρία

Δορυφόρος / Αποστολή	Ακρίβεια μέτρησης ύψους (m)	Ακρίβεια Τροχιάς (m)
SkyLab	~ 100	~ 1000
GEOS-3	25	~ 500
SeaSat	5	~ 100
GeoSat	4	30 -50
ERS-1	3	8 – 15
TOPEX/Poseidon	2	2 – 3
ERS-2	3-4	7 – 8
GFO	2	4 - 5
Jason-1	1-2	1 – 2
EnviSat	2	2
Jason-2	~ 1	~ 1

3.3 Διαστημικές Αποστολές – Δορυφόροι Αλτιμετρίας

Πίνακας 3.2 Εξέλιξη των αποστολών δορυφόρων αλτιμετρίας ως προς την ακρίβεια μέτρησης και τροχιάς τους



Γράφημα 3.2 Γραφική απεικόνιση της βελτίωσης της ακρίβειας μέτρησης ύψους και τροχιάς των τελευταίων αποστολών δορυφόρων αλτιμετρίας

Κεφάλαιο 3. Δορυφορική Αλτιμετρία

3.3 Διαστημικές Αποστολές – Δορυφόροι Αλτιμετρίας



Γράφημα 3.3 Ακρίβεια τροχιάς δορυφόρων αλτιμετρίας ως προς τη μεταβλητότητα των Ωκεανών (CNES)

Στην επόμενη Εικόνα 3.5, εμφανίζεται το ίχνος της τροχιάς του Jason-2 στην επιφάνεια της Γης, για την περιοχή της Ευρώπης και της Μεσογείου.



Εικόνα 3.5 Αποτύπωση των τροχιών του δορυφόρου Jason-2 στην επιφάνεια της Γης (Ground Track)

Στην *Εικόνα 3.6* αποτυπώνονται η κατιούσα τροχιά Νο 018 και η ανιούσα τροχιά Νο 109 των διαστημικών αποστολών Jason, ειδικά για την περιοχή Νότια της Κρήτης, όπου φαίνεται και η διασταύρωσή τους πάνω από τη νήσο Γαύδο.



Εικόνα 3.6 Τροχιές 018 και 109 των δορυφόρων αλτιμετρίας, πάνω από τις Ν. Γαύδος και Κρήτη

Επίσης, ένας χάρτης βαθυμετρίας της εν λόγω περιοχής στην Εικόνα 3.7, δείχνει και την ιδιαίτερη γεωγραφική θέση της Γαύδου ως προς το εντονότατο ανάγλυφο του πυθμένα της θάλασσας, και υποδεικνύει τη σημασία της βαθυμετρίας στη διαμόρφωση του μοντέλου του γεωειδούς, αφού η μεγάλη διακύμανση του βαρυτικού πεδίου λόγω εναλλαγής από στερεό σε υγρό, θα πρέπει να αποτυπώνεται και στο μοντέλο του γεωειδούς που χρησιμοποιείται στην περιοχή. Έτσι, κατά τη δημιουργία του μοντέλου του γεωειδούς, απαιτείται να έχει ληφθεί υπ' όψιν η βαθυμετρία, ειδικά σε ένα περιβάλλον με τόσο έντονο ανάγλυφο, αφού για Νότια κίνηση κατά 30Km, έχουμε αύξηση βάθους θάλασσας κατά 3.000m περίπου.



Εικόνα 3.7 Βαθυμετρικός Χάρτης Ν. Γαύδου

3.4.Χρησιμότητα

Ο κύριος σκοπός χρήσης της δορυφορικής αλτιμετρίας, είναι η καταγραφή της διακύμανσης της στάθμης της θάλασσας.

Ξεκινώντας όμως από αυτό το δεδομένο, ένα μεγάλο πλήθος προβλημάτων διαφορετικών επιστημών είναι δυνατόν να επιλυθούν με τη βοήθεια της δορυφορικής αλτιμετρίας, ενώ επιστημονικές ομάδες έχουν ανάγκη πρόσβασης στα συγκεκριμένα δεδομένα.

Εκτός από τις ιστορικές πια εφαρμογές της γεωδαισίας και της ωκεάνιας κυκλοφορίας, προχωρώντας σε άλλες που βρίσκονται ήδη σε διαδικασία έρευνας και ανάπτυξης, όπως η μελέτη του στερεού φλοιού της Γης και οι παράκτιες εφαρμογές, και σε αυτές που χαρακτηρίζονται κλασικές πια όπως η διακύμανση των ωκεανών, η τοπογραφία των πάγων και η υδρολογία, η δορυφορική αλτιμετρία δείχνει όλο και περισσότερο μια τεχνική ιδιαίτερα χρήσιμη και παραγωγική σε διαφορετικά αντικείμενα.

3.4.1.Γεωδαισία και Γεωφυσική

Δεδομένα που αντλούνται από τα δεδομένα αλτιμετρίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μελέτη του σχήματος και του μεγέθους της Γης, των βαρυτιμετρικών ανωμαλιών βοηθώντας τη Γεωδαισία, του πυθμένα της θάλασσας στη βαθυμετρία ή τη μετακίνηση των τεκτονικών πλακών και ρηγμάτων στις γεωφυσικές μελέτες.

<u>Βαθυμετρία</u>

Στην βαθυμετρία, οι μετρήσεις αλτιμετρίας χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με μετρήσεις βάθους για την παραγωγή χαρτών τοπογραφίας πυθμένα. Δεν μπορεί με αυτή τη μέθοδο να παραχθεί χάρτης μεγάλης ανάλυσης, αλλά πάραυτα, οι χάρτες αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό διόδων για τα ωκεάνια ρεύματα, υποθαλάσσιων ορέων, ορίων τεκτονικών πλακών και θαλάσσιων οροπεδίων.

<u>Γεωδαισία</u>

Στη Γεωδαισία, πολύ σημαντικός ο υπολογισμός της μέσης στάθμης της θάλασσας για τον υπολογισμό του μοντέλου του γεωειδούς. Το γεωειδές ακολουθεί τις ανωμαλίες του βαρυτικού πεδίου της Γης, που οφείλονται κυρίως σε διαφορετική κατανομή των μαζών, αντανακλούν κυρίως την τοπογραφία του πυθμένα της θάλασσας, και το ύψος του μπορεί να μεταβληθεί ακόμη και 100 μέτρα σε μεγάλες αποστάσεις.

<u>Τσουνάμι</u>

Η παρατήρηση της στάθμης της θάλασσας από δορυφόρους αλτιμετίας, βοηθάει επίσης στη μελέτη των τσουνάμι, όσον αφορά στην πρόγνωση, στον πολλαπλασιασμό και στην ταχύτητα μετάδοσης τους. Τα τσουνάμι είναι κύματα που προκαλούνται από υποβρύχιους σεισμούς ή κατολισθήσεις, που στη συνέχεια η διάδοσή τους προσπίπτει σε κάθετες παραμορφώσεις του πυθμένα του ωκεανού. Έτσι σχηματίζονται κύματα μεγάλου ύψους που διασχίζουν το ωκεανό με ταχύτητα ακόμη και 800Km/h, και μεταφέρουν επικίνδυνα μεγάλες ποσότητες νερού στις ακτές. Θεωρητικά η καταγραφή της στάθμης τη θάλασσας θα έδινε τέτοιες μεταβολές του ύψους κύματος. Όμως, η παρατήρησή τους από τους δορυφόρους αλτιμετρίας είναι δύσκολη διότι τέτοιου είδους υψομετρικές ανωμαλίες είναι συνήθης στους ωκεανούς. Μελετώντας όμως τα δεδομένα της αλτιμετρίας για τα τσουνάμι, με συνδυασμό και άλλων επιστημών, είναι δυνατή η καλύτερη κατανόηση του φαινομένου και η κατασκευή ακριβέστερων μοντέλων μελέτης τους.

3.4.2.Ωκεάνια Κυκλοφορία και οι Παραλλαγές της

Η ωκεάνια επιφάνεια μελετάται από την πλειονότητα των εφαρμογών αλτιμετρίας, ενώ πολλές έχουν βελτιστοποιηθεί για το σκοπό αυτό. Τέτοιες εφαρμογές περιλαμβάνουν την ίδια την ωκεανογραφία, καθώς και τις επιπτώσεις της ανακύκλωσης των ωκεανών στο κλίμα, αλλά και αντίστροφα, δηλαδή την επίδραση της αλλαγής κλίματος στην κίνηση των ωκεανών.

Μεγάλης κλίμακας ωκεάνια ρεύματα

Τα ωκεάνια ρεύματα μπορούν να ανεβάσουν τη στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας κατά ένα μέτρο περίπου. Έτσι, τα ρεύματα μπορούν να παρατηρηθούν μελετώντας τις μεταβολές του ύψους της στάθμης. Η δορυφορική αλτιμετρία παρέχοντας συνεχόμενη παγκόσμια κάλυψη, εμπλουτίζει τις πληροφορίες μας για ρεύματα ακόμη από το 1978 με την αποστολή Seasat.

Μια παγκόσμια απεικόνιση της ωκεάνιας κυκλοφορίας φαίνεται στην Εικόνα 3.8, όπως προκύπτει από την αναπαράσταση των μετρήσεων αλτιμετρίας, δείχνει ότι τα ρεύματα στροβιλίζονται γύρω από τους λόφους και τι κοιλάδες της επιφάνειας της θάλασσας. Στο Βόρειο Ημισφαίριο, τα ρεύματα ρέουν γύρω από αυτούς τους λόφους δεξιόστροφα, ενώ αριστερόστροφα κινούνται γύρω από τις κοιλάδες. Το αντίθετο συμβαίνει στο Νότιο Ημισφαίριο. Αυτά τα ρεύματα ανήκουν στη μεγάλης κλίμακας ωκεάνια κυκλοφορία.



Εικόνα 3.8 Ωκεάνια Ρεύματα όπως προκύπτους από επεξεργασία δεδομένων αλτιμετίας (Δυναμική Τοπογραφία - Dynamic Topography) (*http://woce.nodc.noaa.gov/*)

Μέσης Κλίμακας Θαλάσσια Ρεύματα

Η μέσης κλίμακας ωκεάνια κυκλοφορία, περιλαμβάνει φαινόμενα που η δράση τους κυμαίνεται από δέκα έως μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα, και έχουν διάρκεια από μερικές μέρες έως ακόμη και μήνες. Ο μηχανισμός δημιουργίας τους, είναι συνήθως η αλληλεπίδρασή τους με τα μεγάλης κλίμακας ωκεάνια ρεύματα, η βαθυμετρία και η απευθείας επίδραση του ανέμου.

<u>Επιχειρησιακή ωκεανογραφία</u>

Στην επιχειρησιακή ωκεανογραφία, γίνονται προγνώσεις για την κατάσταση των ωκεανών, όπως ακριβώς κάνει η μετεωρολογία για την ατμόσφαιρα. Βασική τεχνική, είναι η χρήση της δορυφορικής αλτιμετίας σχεδόν σε πραγματικό χρόνο.

<u>Παλίρροιες</u>

Οι ωκεάνιες παλίρροιες, ευθύνονται για το 80% της μεταβλητότητας της επιφάνειας στις ανοιχτές θάλασσες. Η δορυφορική αλτιμετρία παρέχει τακτικές μετρήσεις της στάθμης της επιφάνειας της θάλασσας, και έτσι επιτυγχάνεται η πρόγνωσή τους.

<u>Φαινόμενο Θερμοκηπίου</u>

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι επίσης απόλυτα συνδεδεμένο με τη μέση στάθμη της θάλασσας. Όταν ανεβαίνει η παγκόσμια θερμοκρασία, ανεβαίνει και η μέση στάθμη της θάλασσας. Οι δορυφόροι αλτιμετρίας παίζουν κρίσιμο ρόλο στην παρατήρηση των μεταβολών της μέσης στάθμης της θάλασσας, βοηθώντας μας με την πάροδο του χρόνου, να καταγράψουμε τις τάσεις μεταβολής της και να προσπαθήσουμε να μετριάσουμε την επίδραση αυτής της μεταβολής σε μας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέση στάθμη της θάλασσας έχει ρυθμό αύξησης περίπου 3,5mm/year (Γράφημα 3.4), ενώ η αύξηση της στάθμης μεταβάλλεται ανάμεσα σε διάφορες περιοχές του πλανήτη (Εικόνα 3.9).

Κεφάλαιο 3. Δορυφορική Αλτιμετρία 3.4 Χρησιμότητα



Γράφημα 3.4 Μεταβολή της Μέσης Στάθμης της Θάλασσας με την πάροδο των ετών, όπως προκύπτει από τα δεδομένα αλτιμετρίας των δορυφόρων Topex/Poseidon, Jason-1 και Jason-2 *(CNES, LEGOS, CLS)*



Εικόνα 3.9 Μεταβολή της Μέσης Στάθμης της Θάλασσας (MSL) από Οκτώβριο του 1992 έως Μάρτιο του 2010 σε mm/έτος (CNES, LEGOS, CLS)

<u>Εποχές</u>

Ο ωκεανός αλληλεπιδρά με τις εποχές όπως ακριβώς και η ατμόσφαιρα. Για παράδειγμα, το Μάιο το Βόρειο Ημισφαίριο αρχίζει να ζεσταίνεται και να παγώνει το Νότιο. Το εύρος της διακύμανσης της στάθμης της θάλασσας κατά τη διάρκεια των εποχών ήταν μια από τις ανακαλύψεις του Topex/Poseidon. Αυτό μας δείχνει επίσης την ποσότητα της θερμότητας που είναι αποθηκευμένη στο ωκεανό (heat buffer), και εξ' αιτίας αυτού, την επίδρασή του στο κλίμα.

3.4.3.Πάγος

Οι μετρήσεις της αλτιμετρίας μπορούν ακόμη και να χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό του πάγου της θάλασσας και της τοπογραφίας των παγετώνων. Η κίνηση του πάγου και η διασπορά του είναι σημαντικοί δείκτες παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής. Ο πάγος, συμπεριλαμβανομένου και του πάγου της θάλασσας, παίζει ενεργό ρόλο στη διαμόρφωση του κλίματος λόγω της ισχυρής ανατροφοδότησης που προκαλείται λόγω των υψηλών διαφορών θερμοκρασίας, ενώ ο ηπειρωτικός πάγος λειτουργεί ως ένα τεράστιο αποθεματικό του γλυκού νερού (77 % του γλυκού νερού της Γης είναι παγωμένο στη Γροιλανδία και την Ανταρκτική), που θα μπορούσαν να συμβάλουν σημαντικά στην άνοδο της στάθμης της θάλασσας.

Η κρυόσφαιρα⁴ παίζει σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση του παγκόσμιου κλίματος και ως εκ τούτου οι συνέπειες της υποχώρησης της κάλυψης με πάγο λόγω της υπερθέρμανσης του πλανήτη, είναι εντεταμένες και πολύπλοκες. Αν και τα στοιχεία δείχνουν ότι το κάλυμμα πάγου είναι σχετικά σταθερό, υπάρχουν ενδείξεις ότι γρήγορες αλλαγές διαδραματίζονται στο όριά τους, εκεί που ο πάγος έρχεται σε επαφή με τη θάλασσα. Αλλαγές που μπορούν να επιφέρουν αλλαγή στο πάχος του.

⁴ Η κρυόσφαιρα περιλαμβάνει τα τμήματα της επιφάνειας της Γης, όπου το νερό είναι σε στερεά μορφή, συμπεριλαμβανομένου του πάγου της θάλασσας, των λιμνών, των ποταμών, τη χιονοκάλυψη, τους παγετώνες, και παγωμένο έδαφος.

Η δορυφορική αλτιμετρία είναι το ποιο ισχυρό εργαλείο παρατήρησης του θαλάσσιου πάγου. Είναι και το μοναδικό εργαλείο μέτρησης του πάχους του, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην τοπογραφία των στρωμάτων του πάγου. Επίσης, αναλύοντας την κυματομορφή του σήματος του radar όπως ανακλάται από τον πάγο, μπορούμε να εξάγουμε και άλλες πληροφορίες, όπως η τραχύτητα, και χαρακτηριστικά του πακέτου πάγου, όπως η στρωμάτωση και το μέγεθος κόκκου του πάγου. Αυτές οι παράμετροι σχετίζονται με παραμέτρους άγνωστες ακόμη στον τρόπο επηρεασμού του κλίματος, όπως ακόμη ο ρυθμός συσσώρευσης του χιονιού ή η εκτροπή του χιονιού από τον αέρα.

<u>Παγετώνες</u>

Ο πάγος της θάλασσας έχει σοβαρό αντίκτυπο στη στάθμη της θάλασσας. Αν και οι δύο μεγάλοι παγετώνες της Γροιλανδίας και της Ανταρκτικής *(Εικόνα 3.10)* λιώσουν, τότε το επίπεδο της θάλασσας θα ανέβει περίπου κατά 80m. Η δορυφορική αλτιμετρία είναι ένα ισχυρό εργαλείο για τη δυναμική και το ισοζύγιο μάζας των παγετώνων.



Εικόνα 3.10 Τοπογραφικός Χάρτης Ανταρκτικής (CNES)

<u>Θαλάσσιος Πάγος</u>

Για τον θαλάσσιο πάγο, έχουμε τις λιγότερες πληροφορίες που είναι απαραίτητες για την προσομοίωση του κλίματος. Ενώ η έκταση και η ηλικία του μπορεί να μετρηθεί με άλλες μεθόδους, η δορυφορική αλτιμετρία είναι η μόνη που μπορεί να παρέχει το πάχος του πάγου της θάλασσας.

3.4.4.Κλίμα

Η θάλασσα καλύπτει το 71% της επιφάνειας της Γης, και παίζει κύριο ρόλο στις κλιματικές αλλαγές και στη ρύθμιση της θερμοκρασίας. Ο ωκεανός είναι μόνιμα σε κίνηση και ανταλλάσει τεράστια ποσά θερμότητας με την ατμόσφαιρα. Απορροφά μεγάλα ποσά θερμότητας από την έκθεσή του στην ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή του Ισημερινού, και τα μεταφέρει σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη με τη βοήθεια των ρευμάτων μεγάλης κλίμακας όπως το Ρεύμα του Κόλπου (Gulf Stream). Τα ζεστά τροπικά νερά ζεσταίνουν την ατμόσφαιρα. Στους Πόλους, κρύα νερά μετακινούνται στο βάθος του ωκεανού με τη βοήθεια ρευμάτων προς τον Ισημερινό, όπου εκεί ζεσταίνονται και επιστρέφουν πάλι πίσω στους Πόλους. Και αυτός ο κύκλος συνεχίζεται. Επίσης, οι άνεμοι που είναι άμεσα συνδεδεμένοι με τα βαρομετρικά υψηλά και χαμηλά, επηρεάζονται άμεσα και από την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ ωκεανού - ατμόσφαιρας.

Σε χρονική κλίμακα εποχών, αλλά ακόμη και δεκαετιών και εκατονταετιών, η επιρροή των ωκεανών από την ατμόσφαιρα είναι ένα από τα κλειδιά για την πρόβλεψη του κλίματος, συμπεριλαμβανομένων και φαινομένων όπως το Ελ Νίνιο (El Nino).

Η δορυφορική αλτιμετρία είναι ένα από τα πιο σημαντικά εργαλεία για την παρακολούθηση της δυναμικής των ωκεανών, και ως τέτοια, αποτελεί πηγή ζωτικής σημασίας στοιχείων, για να περιληφθούν στα μοντέλα πρόβλεψης των ωκεανών ατμόσφαιρας, γεγονότα όπως το Ελ Νίνιο, μουσώνες, η ταλάντωση του Βόρειου Ατλαντικού ή ακόμη ταλαντώσεις δεκαετιών. Η εποχιακή πρόγνωση του κλίματος επίσης, αρχίζει να αποδίδει ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Οι ωκεανοί με τη σειρά τους, επηρεάζονται από τις διακυμάνσεις του κλίματος, καθώς η στάθμη της θάλασσας ανεβαίνει και πέφτει επηρεαζόμενη από τις διακυμάνσεις τους.

<u>El Niño - La Niña</u>

Το Ελ Νίνιο, προκαλείται από ανώμαλες αφίξεις θερμών νερών από την Ακτή του Περού και τον Ισημερινό στον Ειρηνικό Ωκεανό, προς το κέντρο του Ειρηνικού ωκεανού στην περιοχή του Ισημερινού (NOAA, El Nino). Αυτό το φαινόμενο προκαλεί διαταραχή της αλληλεπίδρασης του συστήματος ωκεανού - ατμόσφαιρας στην περιοχή του Ισημερινού, με σημαντικές συνέπειες στο παγκόσμιο κλίμα. Το φαινόμενο δεν είναι εντελώς προβλέψιμο, αλλά επαναλαμβάνεται κάθε τέσσερα χρόνια περίπου και διαρκεί 18 μήνες. Το αποτέλεσμα του είναι διάφορα ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως ξηρασία, πλημμύρες και κυκλώνες.

Αντίθετα από το Ελ Νίνιο που χαρακτηρίζεται από υψηλές θερμοκρασίες των νερών του ωκεανού, το Λα Νίνια, χαρακτηρίζεται από χαμηλότερες από τις συνήθεις θερμοκρασίες των νερών του ωκεανού (NOAA, NOAA La Nina Page).

Στην Εικόνα 3.11 φαίνεται η μετάβαση από Ελ Νίνιο σε Λα Νίνια για την περιοχή του Ισημερινού στον Ειρηνικό Ωκεανό, από επεξεργασία δεδομένων αλτιμετρίας του δορυφόρου Jason-2 (NASA).

Κεφάλαιο 3. Δορυφορική Αλτιμετρία 3.4 Χρησιμότητα



Εικόνα 3.11 Αναπαράσταση της εξέλιξης του φαινομένου El Niño σε La Niña από το Σεπ. 2009 έως σήμερα, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα αλτιμετρίας του δορυφόρου Jason-2 (NASA)

Ταλάντωση του Βόρειου Ατλαντικού (North Atlantic Oscillation – NAO)

Η ταλάντωση του Βόρειου Ατλαντικού (ΝΑΟ), είναι ένα κλιματολογικό φαινόμενο, που δημιουργείται από διαφορές πίεσης ανάμεσα σε ένα σύστημα υψηλών πιέσεων στην επιφάνεια της θάλασσας πάνω από τις Αζόρες και σε ένα σύστημα χαμηλών πιέσεων πάνω από την Ισλανδία, με το οποίο αλληλεπιδρά ο Ωκεανός. Μέσα από τις Ανατολικά προς Δυτικά κινήσεις ταλάντωσης των Ισλανδικών χαμηλών και των υψηλών στις Αζόρες, ελέγχεται η δύναμη και η διεύθυνση των δυτικών ανέμων και των θυελλών σε όλον το Βόρειο Ατλαντικό. Είναι σε μεγάλο βαθμό συνδεδεμένη με Αρκτική Ταλάντωση, και είναι μέρος της. Η εξήγηση του φαινομένου, γίνεται από δορυφορικές παρατηρήσεις αλτιμετρίας.

<u>Δεκαετείς Ταλαντώσεις</u>

Οι ταλαντώσεις του Βορείου Ατλαντικού είναι κατά κάποιο τρόπο μοναδικές. Παρόμοια φαινόμενα, μεγαλύτερης ή μικρότερης έντασης, κυμαίνονται με περίοδο πολλών ετών, και παρατηρούνται σε όλους τους ωκεανούς του πλανήτη.

<u>Το Δίπολο του Ινδικού Ωκεανού (Indian Ocean Dipole – IOD)</u>

Το Δίπολο του Ινδικού Ωκεανού (IOD), είναι ένας συνδυασμός θάλασσας – αέρα διαμόρφωσης κλίματος στον Ινδικό ωκεανό, με ορισμένες θετικές και αρνητικές κλιματολογικές επιπτώσεις. Τέτοιες είναι οι πλημύρες στην Ανατολική Αφρική, η ξηρασία στην Ινδονησία, μέρος των μουσώνων στην Αυστραλία και οι έντονες βροχοπτώσεις στην Ινδία.

<u>Εποχές</u>

Η δορυφορική αλτιμετρία βοηθά στην εποχιακή πρόγνωση, παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με τη δυναμική των ωκεανών.

3.4.5.Ατμόσφαιρα, Άνεμοι και Κύματα

Η μελέτη των ατμοσφαιρικών φαινομένων, της θαλάσσιας μετεωρολογίας, των αποτελεσμάτων των ειδικών χαρακτηριστικών των ωκεανών, ή ακόμη των καιρικών συνθηκών, είναι δυνατή χρησιμοποιώντας δεδομένα αλτιμετρίας.

Τα μεγάλα κύματα είναι διασκέδαση, ειδικά για τους surfers. Για άλλους όμως, όπως τους ναυτικούς, τους σχεδιαστές παράκτιων κατασκευών και κατοικιών, είναι ένα πρόβλημα που δημιουργεί ενδεχόμενους κινδύνους που πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους. Η αλτιμετρία δεν μπορεί να δώσει τα ύψη κύματος κάθε χρονική στιγμή, τουλάχιστον όχι χωρίς πολύ περισσότερούς δορυφόρους. Τα δεδομένα αλτιμετρίας χρησιμοποιούνται σχεδόν σε πραγματικό χρόνο (εντός 3 έως 48 ωρών), για να βελτιωθούν τα μοντέλα πρόγνωσης του καιρού, αφομοιώνοντας τα δεδομένα σε αυτά. Συγκρίνοντας επιτόπου παρατηρήσεις με μοντέλα (με ή χωρίς αφομοίωση των αλτιμετρικών δεδομένων), πολλές μελέτες έχουν δείξει τις θετικές συνέπειές τους, φέρνοντας τα αποτελέσματα των μοντέλων πολύ κοντά στην πραγματικότητα. Επιπλέον, με 15 χρόνια δεδομένων αλτιμετρίας, ύψους κύματος και στατιστικές ταχύτητας ανέμου, καθώς και εποχιακές ή πολυετής μεταβολές, μπορούν να κατασκευαστούν μοντέλα για τη μελέτη ολόκληρου του Ωκεανού, ή περιφερειακές περιοχές, για σκοπούς όπως υπεράκτιες βιομηχανίες ή πλοήγηση.

Η χρήση της αλτιμετρίας για την μελέτη τυφώνων, δεν περιορίζεται στην μέτρηση πολύ μεγάλων κυμάτων και δυνατών ανέμων και σε αφομοίωση αυτών των δεδομένων στα μοντέλα πρόγνωσης του καιρού. Μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό των θερμών χαρακτηριστικών που μπορούν να προκαλέσουν αυτές τις καταιγίδες με μεγαλύτερη ένταση. Έτσι, οι ανωμαλίες του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένδειξη των θερμών ρευμάτων που παρέχουν στους τυφώνες την πηγή ενέργειας που χρειάζονται για τη δημιουργία τους.

Μια άλλη εφαρμογή της αλτιμετρίας που συνδέεται με ατμοσφαιρικά φαινόμενα, τα οποία απαιτούν χρήση αλτιμέτρων διπλής συχνότητας (ώστε να γίνει εντοπισμός συγκεκριμένων συνθηκών που έχουν γνωστή επίδραση τις συχνότητες

εκπομπής του radar), είναι οι βροχοπτώσεις πάνω από τις θάλασσες, εκεί όπου υπάρχουν ελάχιστοι μετεωρολογικοί σταθμοί.

<u>Άνεμοι και Κύματα</u>

Ανιχνεύονται από τον τρόπο ανάκλασης (και διάδοσης) του σήματος του radar από την επιφάνεια της θάλασσας.

<u>Τυφώνες</u>

Οι τροπικοί κυκλώνες χαρακτηρίζονται από πολύ ψηλά κύματα και πολύ δυνατούς ανέμους, τα οποία μπορούν να μετρηθούν φυσικά από τους δορυφόρους αλτιμετρίας, αλλά θα πρέπει ο δορυφόρος να βρίσκεται εκείνη τη χρονική περίοδο πάνω περίπου από την περιοχή που δρα ο κυκλώνας. Τα δεδομένα όμως μπορούν να συμπεριληφθούν στα μοντέλα μετεωρολογίας σε πραγματικό χρόνο. Όπως προαναφέρθηκε όμως, βοηθούν στον εντοπισμό θερμών ρευμάτων που δημιουργούν τις καταιγίδες.

<u>Βροχή</u>

Κάθε συχνότητα του αλτιμέτρου διπλής συχνότητας επηρεάζεται διαφορετικά από τη βροχή. Αυτό όχι μόνο μας επιτρέπει να καταγράφουμε με ακρίβεια το γεγονός της βροχόπτωσης, αλλά και καταγραφή της ποσότητας των βροχοπτώσεων.

3.4.6.Υδρολογία και Έδαφος

Οι νεότερες αποστολές αλτιμετρίας, είναι αφιερωμένες ως επί το πλείστον στη μελέτη των ωκεανών και ορισμένες μετρήσεις πάγου. Ωστόσο, για κάθε υδάτινο τμήμα της επιφάνειας της Γης, (κλειστές θάλασσες, λίμνες, ποτάμια, πλημμυρισμένες περιοχές, φράγματα) ή ακόμη και για μεγάλες επίπεδες επιφάνειες, είναι δυνατόν να δώσει έγκυρα δεδομένα, φυσικά όσο ο δορυφόρος περνά πάνω από αυτά. Η αλτιμετρία έχει το πλεονέκτημα να μας δίνει παγκόσμια ομοιογενή και επαναλαμβανόμενα δεδομένα, επιτρέποντας συστηματική παρακολούθηση σε διάστημα ετών. Είναι ανεμπόδιστη από σύννεφα, νύχτα ή μέρα, ή ακόμη και από βλάστηση.

Ωστόσο, αυτή η τεχνική είναι κυρίως βελτιστοποιημένη για ωκεανό (παρόλο που μπορεί να εφαρμοστεί και σε συγκεκριμένες εκτάσεις στην ξηρά) και λαμβάνει μετρήσεις μόνο κάτω από το δορυφόρο, με ένα μάλλον στενό ίχνος του radar στην επιφάνεια της Γης. Πάνω από στερεή επιφάνεια (υγρή η ξηρή), η ακρίβεια των μετρήσεων που λαμβάνουμε από την αλτιμετρία μπορεί να υποβαθμιστεί σε αρκετά εκατοστά ή δεκάδες εκατοστά, κυρίως λόγω της ετερογένειας της ανακλώσης επιφάνειας.

Μια άλλη σημαντική πηγή του σφάλματος έγκειται στη μετάδοση του σήματος μέσω της ατμόσφαιρας. Οι δορυφόροι αλτιμετίας επαναλαμβάνουν τις τροχιές τους μάλλον αραιά (από κάθε 10 έως 35 ημέρες), και συνήθως δεν προσφέρονται για παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, της στάθμης ποταμών ή λιμνών (π.χ. ώστε να χρησιμεύουν στην προειδοποίηση για πλημύρες), αλλά λειτουργούν πάρα πολύ καλά για εποχιακή ή πολυετή παρακολούθηση.

Λίμνες και Κλειστές Θάλασσες

Η στάθμη των λιμνών μεταβάλλεται με τις εποχές. Η στάθμη των κλειστών θαλασσών, είναι ένα καλό χαρακτηριστικό της υγιούς συμπεριφοράς τους. Η αλτιμετρία λοιπόν καταγράφει συνεχώς αυτές τις διακυμάνσεις.

<u>Στεριά</u>

Η λήψη του ανακλώμενου σήματος του radar από τη στεριά είναι λιγότερο αξιόπιστη από το νερό, καθώς η ανάκλαση από ένα δάσος για παράδειγμα δεν ανακλά την κυματομορφή του radar όπως το νερό, αλλά ακόμη και τότε, χρήσιμα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν.

<u>Ποτάμια</u>

Σε ορισμένα ποτάμια ή υγροβιότοπους, είναι συχνά δύσκολη η επιτόπου συλλογή υδρολογικών στοιχείων λόγω του δυσπρόσιτου της περιοχής, ή της αδυναμίας εγκατάστασης επίγειων σταθμών, η ακόμη γιατί αν εγκατασταθούν οι σταθμοί, υπάρχει πρόβλημα μετάδοσης των δεδομένων. Η δορυφορική αλτιμετρία δίνει λύση στην παρακολούθηση χερσαίων υδάτων, αφού παρέχει ακριβή, συνεχόμενη και μόνιμη καταγραφή της στάθμης τους.

3.4.7.Παράκτιες Εφαρμογές

Πολλές τρέχουσες μελέτες προσπαθούν να βελτιώσουν την ποιότητα των δεδομένων υψομετρίας κοντά στις ακτές. Νέες μέθοδοι επεξεργασίας και εφαρμογές αναπτύσσονται για παράκτιες περιοχές και σε ρηχά νερά, μερικά από τα πιο ευαίσθητα και σημαντικά σημεία των ωκεανών.

Η έλλειψη στοιχείων αλτιμετρίας κοντά στις ακτές (ή κατώτερης ποιότητας τους) οφείλεται σε διάφορους παράγοντες:

- η τεχνική της αλτιμετρίας από μόνη της, έχει το πρόβλημα ότι το σήμα του radar που ανακλάται από την επιφάνεια του νερού, ή από το συνδυασμό νερού και στεριάς, δεν είναι ίδιο, οπότε απαιτείται επεξεργασία από τους σταθμούς εδάφους.
- το γεγονός ότι τα κύρια δεδομένα που διανέμονται από το σύστημα αλτιμετρίας είναι ανά ένα δευτερόλεπτο, και αφού ο δορυφόρος κινείται με 7Km/sec, και το ίχνος του περίπου με 5Km/sec, τότε θα έχουμε μια μέτρηση κάθε περίπου 5Km. Υπάρχουν διαθέσιμα και δεδομένα ανά 1/20sec, αλλά αυτά έχουν προκύψει από παρεμβολή των πρωτογενών δεδομένων, με ότι σφάλματα μπορεί να περιέχει αυτό.
- ο υπολογισμός κάποιων διορθώσεων. Οι παλίρροιες για παράδειγμα,
 είναι πολύ πιο πολύπλοκες κοντά στην ξηρά από ότι στον ανοιχτό
 ωκεανό και απαιτούν πολύ ακριβή γνώση της παράκτιας
τοπογραφίας για να υπολογιστούν. Επιπλέον οι μεταβολές τους είναι ταχύτατες. Επίσης οι διορθώσεις για το υγρό στοιχείο της τροπόσφαιρας στερούνται ακρίβειας.

Για να γίνει σαφέστερο το μέγεθος του προβλήματος της ποιότητας των μετρήσεων του radar κοντά στις ακτές, στην *Εικόνα 3.12* που ακολουθεί (CNES, CLS), φαίνονται οι τροχιές των δορυφόρων αλτιμετρίας πάνω από τη Μεσόγειο, όπου με πράσινο παριστάνονται τα τμήματα των τροχιών που συμπεριλαμβάνονται στα δεδομένα αλτιμετρίας, ενώ με κόκκινο παριστάνονται τα τμήματα των τροχιών κοντά στις ακτές, όπου τα δεδομένα εξαιρούνται από τις μετρήσεις για εφαρμογή στην αλτιμετρία. Χαρακτηριστικό είναι ότι έχει αφαιρεθεί από τις μετρήσεις του δορυφόρου, ολόκληρο το Αιγαίο. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί, ότι η απεικόνιση είναι αρκετά χονδροειδής και στερείται ακρίβειας.



Εικόνα 3.12 Περιοχές Κάλυψης των δορυφόρων Jason-1 και Jason-2 στη Μεσόγειο. Με πράσινα τα τμήματα των τροχιών που συμπεριλαμβάνονται στις μετρήσεις για περαιτέρω επεξεργασία, ενώ με κόκκινο αυτά που αποκλείονται λόγω της θέσης τους κοντά στις ακτές (CNES, 2009)

Τέτοιες μελέτες, σύντομα θα οδηγήσουν σε πρόοδο που θα καταστήσει τα δεδομένα αλτιμετρίας χρήσιμα και κοντά στις ακτές. Χρησιμοποιώντας νέες τεχνολογίες, όπως η επεξεργασία διαφορετικών ανακλάσεων του radar, και με την πραγματοποίηση νέων δορυφορικών αποστολών όπως του τεχνολογικά εξελιγμένου Jason-2 (που ήδη είναι σε λειτουργία), έχουμε πολύ καλύτερα αποτελέσματα από αυτά που εμφανίζονται στην *Εικόνα 3.12*, και μπορούμε να ελπίζουμε στο μάλλον για πραγματικά ακριβή δεδομένα αλτιμετρίας στις ακτές.

3.4.8.Βιολογία

Η ζωή στον ωκεανό είναι θεμελιώδης για την ζωή στον πλανήτη. Το φυτοπλαγκτόν είναι στην πραγματικότητα η μεγαλύτερη γεννήτρια ζωής και οξυγόνου στον πλανήτη μας, ακόμη μεγαλύτερη και από τα δάση. Παρά το γεγονός ότι καταγράφοντας το «χρώμα του ωκεανού» από δορυφόρους είναι η καλύτερη τεχνική μέτρησης της ποσότητας του φυτοπλαγκτόν, η μέτρηση της στάθμης της επιφάνειας της θάλασσας με τη δορυφορική αλτιμετρία συμπληρώνει και επαληθεύει αυτά τα δεδομένα.

Οι κινήσεις του ωκεανού, η θερμοκρασία του και η αλατότητά του, επηρεάζουν τη ζωή στις παράκτιες περιοχές. Από τους μικρότερους φυτικούς μικροοργανισμούς (φυτοπλαγκτόν) έως και το μεγαλύτερο (φάλαινες), και από τα ψάρια έως τις θαλάσσιες χελώνες, όλα επηρεάζονται από τις φυσικές συνθήκες του περιβάλλοντός τους.

Αναπτύσσοντας μοντέλα για το θαλάσσιο οικοσύστημα με τις διαθέσιμες βιολογικές και φυσικές πληροφορίες σαν δεδομένα, θα μας βοηθήσει σε καλύτερη κατανόηση της θαλάσσιας βιολογίας, και συνεπώς, στη διατήρηση των πόρων και της ποικιλομορφίας.

<u>Αλτιμετρία και Φυτοπλαγκτόν</u>

Το φυτοπλαγκτόν, παράγει περισσότερο οξυγόνο και δεσμεύει περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα ακόμη και από τα δάση. Επίσης, είναι το πρώτο στοιχείο της τροφικής αλυσίδας των ωκεανών. Συνδυασμένες παρατηρήσεις από υπέρυθρες καταγραφές (χρώμα του ωκεανού) και καταγραφή αλτιμετρίας, είναι πολύ χρήσιμες για την παρατήρησή τους και την αξιολόγησή τους.

<u>Θαλάσσια Θηλαστικά</u>

Συνδυασμένες παρατηρήσεις αλτιμετρίας και δεδομένα από το σύστημα Argos (Advanced Research and Global Observation Satellite) το οποίο έχει τοποθετηθεί σε διάφορα θαλάσσια θηλαστικά, μας δίνουν πληροφορίες για τη διατροφή και την αναπαραγωγή τους.

Κεφάλαιο 4. Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (GPS)

4.1.Βασικές Αρχές Λειτουργίας GPS



Εικόνα 4.1 Δύο από τους Δορυφόρους GPS – Αριστερά Block II-Α και Δεξιά Block II-F (NASA)

To GPS (*Global Positioning System*), είναι ένα παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης και εντοπισμού θέσης, που παρέχει αξιόπιστες πληροφορίες θέσης και χρόνου κάτω από οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες, οποιαδήποτε στιγμή, σε οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη ή κοντά σε αυτόν, όταν και όπου υπάρχει ανεμπόδιστη οπτική επαφή με τέσσερις ή περισσότερους δορυφόρους GPS.



Εικόνα 4.2 Αστερισμός GPS - Navstar Constellation: GPS Block IIA, IIR/M, IIF

Αναπτύχθηκε και ελέγχεται μέσω του Υπουργείου Εθνικής Αμύνης των ΗΠΑ, και είναι ελεύθερα διαθέσιμο σε οποιονδήποτε διαθέτει δέκτη GPS.

Το σύστημα στην πλήρη εξέλιξή του αποτελείται από 24 δορυφόρους (Εικόνα 4.1), μοιρασμένους σε 6 τροχιακά επίπεδα (Εικόνα 4.2), σε ύψος 20.200Km πάνω από την επιφάνεια της Γης. Κάθε τροχιακό επίπεδο σχηματίζει γωνία 60° με το προηγούμενο, και περιέχει 4 δορυφόρους εξίσου διαχωρισμένους στην τροχιά με γωνία 120°. Η περίοδος περιστροφής των δορυφόρων είναι 11 ώρες και 58 λεπτά. Ο τροχιακός αυτός σχηματισμός, παρέχει παγκόσμια κάλυψη 24 ώρες το εικοσιτετράωρο και 365 μέρες το χρόνο, όντας τουλάχιστον 6 δορυφόροι ορατοί από οποιοδήποτε σημείο στην επιφάνεια της Γης.

Το GPS, μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από τρία μεγάλα τμήματα: το δορυφορικό τμήμα, το τμήμα ελέγχου, και το τμήμα χρήσης (Εικόνα 4.3). Το δορυφορικό τμήμα αναφέρεται στους δορυφόρους κα στις τροχιές τους. Το τμήμα ελέγχου αποτελείται από διάφορους σταθμούς ελέγχου και παρακολούθησης των δορυφορικών σημάτων και έναν κύριο σταθμό ελέγχου (Master Control Station). Τέλος το τμήμα χρηστών αποτελείται από τους δορυφορικούς δέκτες που κάνουν χρήση του συστήματος GPS.





Κάθε δορυφόρος εκπέμπει ραδιοσήματα σε δύο βασικές συχνότητες (εκτός άλλων συχνοτήτων που προστέθηκαν αργότερα):

- L1 = 1.575,42 MHz
- L2 = 1.227,60 MHz

Τα φέροντα αυτά σήματα, διαμορφώνονται με τρείς κώδικες:

 «Ρ κώδικας» (Precision Code) : περιέχει μια ακριβή μέτρηση του χρόνου μετάδοσης του σήματος από το δορυφόρο στο δέκτη

- «C/A Κώδικας» (Coarse/Acquisition Code) : παρέχει μια πρώτη μέτρηση της απόστασης από το δορυφόρο στο δέκτη και πληροφορίες για τη λήψη του κώδικα ακριβείας P από τον δέκτη, ο οποίος είναι αδύνατο να ληφθεί αυτομάτως από το δέκτη χωρίς επιπρόσθετες πληροφορίες από τον κώδικα C/A.
- «D κώδικας ή κώδικας δεδομένων» ή μήνυμα ναυσιπλοΐας (D Code) :
 Δίνει πληροφορίες για τη θέση των δορυφόρων κάθε χρονική στιγμή,
 το χρόνο εκπομπής του σήματος από το δορυφόρο και άλλες
 παραμέτρους που περιγράφουν τη γενική κατάσταση του GPS.

To GPS εκσυγχρονίζεται συνεχώς, Έτσι σήμερα έχουν προστεθεί άλλες δύο συχνότητες:

- L5 = 1.176,45 MHz για εφαρμογές που σχετίζονται με την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής
- L2C = 1.227,60 MHz για πολιτικές εφαρμογές και επιτρέπει διορθώσεις για τις καθυστερήσεις του σήματος λόγω ιονόσφαιρας σε μη στρατιωτικούς δέκτες.

Η λειτουργία του GPS, βασίζεται στην ακόλουθη αρχή: Ο χρήστης με έναν δέκτη λαμβάνει τα δορυφορικά σήματα. Μετά την αποκωδικοποίηση των σημάτων καθορίζεται η απόσταση δορυφόρου δέκτη, καθώς και η ταχύτητα μεταβολής της. Ο προσδιορισμός αυτός γίνεται με τη μέτρηση με μεγάλη ακρίβεια του χρόνου μετάδοσης του σήματος από το δορυφόρο στο δέκτη. Κατόπιν πολλαπλασιάζοντας αυτό το χρόνο με την ταχύτητα διάδοσης του σήματος (ταχύτητα φωτός) καθορίζεται η απόσταση δορυφόρου δέκτη. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει ή με τον κώδικα P, ή με τον κώδικα C/A ή με τη μέτρηση της φάσης του φέροντος σήματος L1 ή L2.

Γνωρίζοντας τις θέσεις των δορυφόρων τη στιγμή της παρατήρησης χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του κώδικα D, και έχοντας βρει την απόσταση δορυφόρου δέκτη, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η θέση του δέκτη βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια μια σφαίρας με κέντρο το δορυφόρο και ακτίνα την απόσταση δορυφόρου - δέκτη. Μετρώντας τρείς αποστάσεις προς τρείς διαφορετικούς δορυφόρους ταυτόχρονα, προσδιορίζουμε τη θέση του δέκτη ως την τομή των τριών σφαιρών με κέντρα τις τρείς γνωστές θέσεις των δορυφόρων στο διάστημα.

Ανάλογη διαδικασία ακολουθείται όταν χρησιμοποιείται η ταχύτητα μεταβολής της απόστασης δορυφόρου δέκτη ως βασική μέτρηση. Η μόνη διαφορά είναι ότι ο δέκτης θα βρίσκεται στην τομή τριών υπερβολοειδών εκ περιστροφής και όχι σφαιρών.

Για να μετρηθεί η απόσταση δορυφόρου - δέκτη με ακρίβεια χιλιοστού, όπως φαίνεται και στην *Εξίσωση (4.1)*, απαιτείται μια ακρίβεια χρονομέτρου της τάξης των 3 picoseconds.

$$t = \frac{s}{v} = \frac{1 mm}{300.000 \, km/sec} = 3 \times 10^{-12} seconds = 3 \, picoseconds \tag{4.1}$$

Έτσι, για να έχουμε ακρίβεια προσδιορισμού θέσης της τάξης του χιλιοστού, θα πρέπει να τηρείται αυτή η ακρίβεια χρόνου από τα χρονόμετρα τόσο του δορυφόρου όσο και του δέκτη, αλλά και να γίνεται και σωστός συγχρονισμός τους.

Οι δορυφόροι φέρουν δικά τους ατομικά χρονόμετρα που είναι συνήθως ρουβιδίου ή καισίου, με αστάθεια των συχνοτήτων τους να είναι μερικά μέρη στα 10⁻¹³ κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, και η συμπεριφορά τους προβλέπεται και ελέγχεται από τον κύριο σταθμό ελέγχου στο Colorado. Ο συγχρονισμός τους γίνεται σε σχέση με το χρόνο αναφοράς του συστήματος GPS, ο οποίος τηρείται από μια σειρά ατομικών χρονομέτρων του παρατηρητηρίου του Αμερικάνικου Ναυτικού και της Χαρτογραφικής Υπηρεσίας των ΗΠΑ.

Οι δέκτες GPS όμως, λόγω κόστους, συνήθως δεν έχουν χρονόμετρα ακριβείας, αλλά συχνά κάποια φθηνά χρονόμετρα κρυστάλλου. Έτσι προστίθεται άλλος ένας άγνωστος στους υπολογισμούς προσδιορισμού θέσης (*X*, *Y*, *Z*) ή (*φ*, *λ*, *h*): η χρονική καθυστέρηση *dT* του χρονομέτρου του δέκτη σε σχέση με το χρόνο αναφοράς του GPS.

Από τα παραπάνω λοιπόν είναι προφανές ότι πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τέσσερις δορυφόρους για να υπολογίσουμε τις τέσσερις άγνωστες παραμέτρους (φ, λ, h , dT), λύνοντας ένα σύστημα τεσσάρων εξισώσεων με τέσσερις αγνώστους. Η απόλυτα προσδιοριζόμενη θέση (φ, λ, h), αναφέρεται στο Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς του 1984 (*World Geodetic System 1984 – WGS84*), το οποίο ορίζεται ως εξής:

- i. Έχει αρχή των αξόνων του το κέντρο μάζας της Γης
- ii. Ο άξονας Ζ είναι παράλληλος με τη διεύθυνση του Πόλου.
- Ο άξονας Χ διέρχεται από την τομή του Μεσημβρινού του Greenwich και
 του Ισημερινού του 1984.0
- iv. Ο άξονας Y συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα αξόνων.

Η βασική μέτρηση του GPS, θα έπρεπε να ήταν η πραγματική απόσταση δορυφόρου-δέκτη. Αυτό όμως δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα, διότι ο μετρούμενος χρόνος διάδοσης του σήματος, περιλαμβάνει διάφορες καθυστερήσεις από την ατμόσφαιρα, την ιονόσφαιρα, την τροπόσφαιρα, πολυκλαδικές παρεμβολές, αλλά και τις καθυστερήσεις των χρονομέτρων δορυφόρου και δέκτη. Για το λόγο αυτό η μετρούμενη απόσταση δεν είναι η πραγματική και ονομάζεται φευδοαπόσταση (pseudo-range).

4.2.Μέθοδοι προσδιορισμού θέσης με GPS

4.2.1.Απόλυτος Προσδιορισμός Θέσης

Ο απόλυτος εντοπισμός (Εικόνα 4.4), πραγματοποιείται από το δέκτη σε πραγματικό χρόνο. Ο απόλυτος εντοπισμός, υπολογίζεται ως προς το γεωκεντρικό γεωσταθερό σύστημα αναφοράς συντεταγμένων WGS84, με τη χρήση τουλάχιστον τεσσάρων δορυφόρων.



Εικόνα 4.4 Απόλυτος προσδιορισμός θέσης με GPS

Η ακρίβεια του απόλυτου προσδιορισμού θέσης κυμαίνεται από 0,5 έως 5m περίπου.

4.2.2.Σχετικός Προσδιορισμός Θέσης

Αντίθετα με τον απόλυτο προσδιορισμό, στο σχετικό προσδιορισμό (Εικόνα 4.5), η θέση του δέκτη προσδιορίζεται σε σχέση με κάποιον άλλο δέκτη που είναι στάσιμος και βρίσκεται σε γνωστή με ακρίβεια θέση.



Εικόνα 4.5 Σχετικός Στατικός Προσδιορισμός με GPS

Με αυτή τη μέθοδο, έχουμε τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε τις διαφορές παρατηρήσεων και πραγματικών συντεταγμένων του γνωστού σημείου (Α στην Εικόνα 4.5) (ΔΧ, ΔΨ, ΔΖ), ώστε να προσδιορίσουμε και να εξαλείψουμε κοινά σφάλματα (π.χ. δεκτών, δορυφόρων ή ατμόσφαιρας) και να βελτιώσουμε την ακρίβεια των παρατηρήσεων του δεύτερου δέκτη (Β στην Εικόνα 4.5).

Κατά το σχετικό προσδιορισμό θέσης, διακρίνονται τέσσερις διαφορετικές μέθοδοι, ανάλογα με την κίνηση του Β δέκτη, το χρόνο και τη μέθοδο επίλυσης:

Σχετικός Στατικός Εντοπισμός

Στη μέθοδο αυτή, και οι δύο δέκτες είναι ακίνητοι. Οι διορθώσεις (ΔΧ, ΔΨ, ΔΖ) υπολογίζονται σύμφωνα με τις μετρήσεις στη γεωδαιτικά γνωστή θέση Α και χρησιμοποιούνται για τον ακριβή υπολογισμό του δέκτη στη θέση Β. Η επεξεργασία και διόρθωση των μετρήσεων του δέκτη Β, γίνεται εκ των υστέρων (a posteriori). Η ακρίβεια προσδιορισμού θέσης που επιτυγχάνεται είναι κάτω του εκατοστού.

<u>Κινηματικός Εντοπισμός</u>

Κατά τον κινηματικό προσδιορισμό, ο δέκτης Β κινείται, οπότε η εφαρμογή των διορθώσεων που υπολογίζονται για τον δέκτη Α, εφαρμόζονται τις μετρήσεις του δέκτη Β, με επεξεργασία εκ των υστέρων, ενώ η ακρίβεια που επιτυγχάνεται φτάνει ακόμη και το ένα εκατοστό.

Εντοπισμός με Μέθοδο Στάσης και Αναχώρησης (stop & go)

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, χρησιμοποιούνται πάλι δύο δέκτες GPS. Ο πρώτος είναι εγκατεστημένος σε γνωστή γεωδαιτικά θέση, και βάσει των μετρήσεών του παράγονται οι διορθώσεις (ΔΧ, ΔΨ, ΔΖ). Ο δεύτερος δέκτης, κινείται όπως και στην μέθοδο σχετικού κινηματικού εντοπισμού, με τη μόνη διαφορά ότι πραγματοποιούνται στάσεις σε σημεία ενδιαφέροντος για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα 10-60sec. Οι ακρίβειες που επιτυγχάνονται είναι της τάξης του εκατοστού. Απαραίτητο στη μέθοδο αυτή, είναι να μην χάνουν οι δέκτες την επαφή τους με τους κοινούς δορυφόρους κατά τη διάρκεια των μετακινήσεων.

Εντοπισμός σε Πραγματικό Χρόνο

Μετρήσεις σχετικού προσδιορισμού σε πραγματικό χρόνο, πραγματοποιούνται είτε:

- α) με τη μέθοδο του διαφορικού εντοπισμού
- β) με τη μέθοδο του κινηματικού εντοπισμού.

Κατά τη μέθοδο του διαφορικού προσδιορισμού θέσης (Εικόνα 4.6), χρησιμοποιούνται μόνο οι μετρήσεις κώδικα και απαιτούνται δύο δέκτες GPS, οι οποίοι παρατηρούν τους ίδιους δορυφόρους και είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους ασύρματα με μια ζεύξη δεδομένων. Ο ένας δέκτης είναι σταθερά τοποθετημένος σε σημείο γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων και καλείται σταθμός αναφοράς. Αυτός ο δέκτης παράγει διορθώσεις για τους συγκεκριμένους δορυφόρους που από κοινού παρατηρούν οι δύο δέκτες, τις οποίες μεταδίδει ασύρματα στον κινούμενο δέκτη, ώστε να γίνουν οι αντίστοιχες συνορθώσεις. Η απλή μορφή διορθώσεων, είναι οι διαφορές στις συντεταγμένες του σταθμού αναφοράς (ΔΧ, ΔΨ, ΔΖ) ή (Δφ, Δλ, Δh). Ο χρήστης τότε απλά προσθέτει αυτές τις διορθώσεις των συντεταγμένων του σταθμού αναφοράς στην απόλυτα προσδιορισμένη θέση του δέκτη του, που είναι και το πλεονέκτημα της μεθόδου. Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται είναι της τάξης των 0,2 – 0,5 μέτρων.



Εικόνα 4.6 Διαφορικός Εντοπισμός με GPS για ναυσιπλοΐα

Κατά τον κινηματικό εντοπισμό σε πραγματικό χρόνο, ο δέκτης βρίσκεται σε κίνηση (π.χ. πάνω σε πλωτό μέσο ή αεροπλάνο) και χρησιμοποιείται και η φάση του φέροντος κύματος. Η λύση είναι μια χρονοσειρά της τροχιάς του δέκτη και των χρονικών καθυστερήσεων του χρονομέτρου του και η ακρίβεια είναι της τάξης του εκατοστού.

Κεφάλαιο 5.Βαθμονόμηση / Επικύρωση Μετρήσεων Αλτιμετρίας (CAL/VAL)

5.1.Εισαγωγή

Η βαθμονόμηση (calibration) και η επικύρωση (validation) των μετρήσεων των δορυφόρων αλτιμετρίας, που χάριν συντομίας αποκαλείται Cal/Val (CALibration / VALidation), είναι αυτές οι διαδικασίες που ορίζουν την ποιότητα των δεδομένων, και περιλαμβάνουν την επεξεργασία και τον ποιοτικό έλεγχό τους, έτσι ώστε να διασφαλίζουν τη συνεχή και αξιόπιστη παροχή δεδομένων αλτιμετρίας στην πάροδο του χρόνου, και τη διασύνδεση των μετρήσεων από διαφορετικές αποστολές.

Επιστημονικές ομάδες ασχολούνται με τη βαθμονόμηση των δορυφορικών οργάνων και μελετούν τις παραμέτρους, τις διορθώσεις και το μέγεθος του σφάλματός λειτουργίας τους, ώστε αυτά να εφαρμοστούν στις μετρήσεις αλτιμετρίας. Ειδικότερα, το έργο αυτό περιλαμβάνει την επικύρωση και την λεπτομερή ρύθμιση αλγορίθμων, σε στενή συνεργασία με ομάδες ανάπτυξης, επεξεργασίας και χρήσης του συστήματος. Όταν μια αποστολή είναι πλήρως σε εξέλιξη, οι εργασίες βαθμονόμησης και επικύρωσης συνίστανται στον καθορισμό της ποιότητας των δεδομένων και του ελέγχου του σφάλματος διολίσθησης του αλτιμέτρου. Ο ποιοτικός έλεγχος επιτυγχάνεται με τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων, ανάλυση στα σημεία διασταύρωσης δορυφορικών τροχιών, και με συγκρίσεις των δεδομένων μεταξύ αυτών. Επίσης, όταν είναι εφικτό, τα δεδομένα μια διαστημικής αποστολής συγκρίνονται με άλλες, προς διασταύρωση της αξιοπιστίας των μετρήσεων.

Για να είναι δυνατή αυτή η σύγκριση και η διασύνδεση των δεδομένων διαφορετικών αποστολών, η επιστημονική κοινότητα ανέπτυξε διάφορους μηχανισμούς, για να πληρούνται διάφοροι δείκτες ποιότητας που θεσπίστηκαν. Ένας τέτοιος μηχανισμός περιλαμβάνει συγκεκριμένο εξοπλισμό, για την παροχή βαθμονόμησης και επικύρωσης των δορυφορικών αποστολών αλτιμετρίας.

5.2.Απόλυτη και σχετική Βαθμονόμηση

Η απόλυτη βαθμονόμηση ενός οργάνου αλτιμετρίας (ESA, CNES), είναι η σύγκριση των μετρήσεών του με ανεξάρτητες μετρήσεις από άλλο επίγειο όργανο, (όπως παλιρροιογράφο, πλωτήρα με GPS⁵ (GPS buoy - *Εικόνα 5.1*), της ίδιας παραμέτρου, του υψομέτρου της θαλάσσιας στάθμης (SSH). Η απόλυτη αυτή βαθμονόμηση, παρέχει ένα σημείο αναφοράς για όλη τη χρονική σειρά των μετρήσεων.

Στην σχετική βαθμονόμηση, δύο συστήματα αλτιμετρίας συγκρίνονται μεταξύ τους ως προς τα παγκόσμια γεωφυσικά δεδομένα που καταγράφουν (ESA, CNES). Εξ' αιτίας του μεγάλου όγκου δεδομένων που καταγράφονται, συχνά η σχετική βαθμονόμηση δίνει καλύτερα αποτελέσματα από την απόλυτη. Εκεί ακριβώς είναι το όφελος αυτής της τεχνικής: να εξασφαλιστεί η συνοχή δύο διαφορετικών αλληλεπικαλυπτόμενων αποστολών.

⁵ Τα GPS Buoys είναι πλωτήρες, μέσα ή πάνω στους οποίους είναι εγκατεστημένος γεωδαιτικός εξοπλισμός (GPS) και εξοπλισμός υποστήριξης (μπαταρίες – φωτοβολταϊκά), επικοινωνίας (3G– GPRS modems) με το σταθμό ελέγχου του και φωτεινός σημαντήρας. Χρησιμοποιείται για την συνεχή καταγραφή της θέσης παρατήρησης και επομένως του ύψους h, καθώς και άλλων τοπικών δεδομένων, όπως ο κυματισμός, η αλατότητα του νερού και η θερμοκρασία του αέρα και του νερού.



Εικόνα 5.1 Σημαντήρας GPS (GPS Buoy) στην θαλάσσια περιοχή κοντά στο Πολυτεχνείο Κρήτης σε πειραματικές δοκιμές του Εργαστηρίου GeoMatLab.

Τα αλτιμετρικά δεδομένα μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου που δημιουργούνται από δύο διαφορετικές αποστολές, χρειάζεται να βαθμονομηθούν μεταξύ τους, με την απαιτούμενη ακρίβεια ανά περίπτωση, ώστε τελικά να μας δώσουν ταυτόσημα δεδομένα από πολλαπλούς δορυφόρους. Αυτή η μεταξύ τους βαθμονόμηση (*inter-calibration ή cross-calibration*), είναι στην ουσία ο προσδιορισμός της σχετικής απόκλισης ανάμεσα στις μετρήσεις διαφορετικών αλτιμέτρων.

Η διαδικασία βαθμονόμησης μεταξύ δύο συστημάτων αλτιμετρίας, περιλαμβάνει την επικύρωση του αποτελέσματος των μετρήσεων και την επαλήθευση των αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν. Ο τελικός στόχος είναι η διανομή επικυρωμένων προϊόντων σε όλους τους χρήστες εντός εβδομάδας ή μηνός μετά τη λήψη δεδομένων από το αλτίμετρο.

5.3.Μεθοδολογία Βαθμονόμησης / Επικύρωσης (CAL/VAL)

Όπως προαναφέρθηκε στις αρχές λειτουργίας της Αλτιμετρίας, (Παράγραφο 3.2.2), και εφαρμόζοντας την βασική Σχέση (3.1) της αλτιμετρίας για ένα σημείο *k* (Εικόνα 5.2), τότε θα έχουμε (Mertikas, 2009):

$$SSH(k) = H(k) - R(k)$$
(5.1)



Εικόνα 5.2 Μεθοδολογία βαθμονόμησης / επικύρωσης μετρήσεων Αλτιμετρίας

Στην *Σχέση (5.1),* πρέπει να εφαρμοστούν διορθώσεις για τις επιδράσεις στη μέτρηση της απόστασης **R**. Οι διορθώσεις αυτές, γίνονται για την καθυστέρηση διάδοσης του σήματος λόγω:

- της ιονόσφαιρας (*lono(k)*)
- του υγρού (*Wet(k)*)και ξηρού (*Dry(k)*) στοιχείου της τροπόσφαιρας
- διορθώσεις για την διακύμανση της επιφάνειας της θάλασσας (Sea State Bias SSB).

Έτσι, μια πιο ακριβής έκφραση της σχέσης (5.1) , θα ήταν (5.2):

$$SSH(k) = H(k) - R(k) + [Iono(k) + Wet(k) + Dry(k) + SSB(k)]$$
(5.2)

Επίσης, εκτός από το **R**, το **SSH** θα πρέπει να διορθωθεί και για τις επιδράσεις διαφόρων ειδών παλίρροιας ως εξής (Σχέση (5.3)):

$$Corrected SSH(k) = SSH(k) +$$
[Solid Earth Tide(k) + Pole Tide(k) + Ocean Tide(k)]
(5.3)

Τα δεδομένα της *Σχέσης (5.3),* παρέχονται από τη Βάση Δεδομένων (*Geophysical Data Records - GDR*)⁶ (CNES, CLS) των δορυφόρων, μετά από μακροχρόνιες παρατηρήσεις για βαθμονόμηση / επικύρωση αυτών.

Το ίχνος του ραδιομέτρου (Εικόνα 3.3) στην επιφάνεια της Γης⁷, είναι 25-30 χιλιόμετρα, ενώ η ανάκλαση του σήματος του radar αλλοιώνεται από την επίδραση της ξηράς, καθώς ο δορυφόρος πλησιάζει πάνω από την ακτογραμμή. Αυτό το φαινόμενο είναι άλλη μια αρνητική παράμετρος που θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν

⁶ Τα GDRs είναι δεδομένα αλτιμετρίας επιπέδου 2, τα οποία περιλαμβάνουν μετρήσεις χρονολογικά και γεωγραφικά ταξινομημένες, και εκφρασμένες σε φυσικές μονάδες μέτρησης. Αυτές οι μετρήσεις περιέχουν διορθώσεις για σφάλματα που προκαλούνται από τη μετάδοση του σήματος στην ατμόσφαιρα, τις επιπτώσεις της κατάστασης της επιφάνειας θάλασσας, καθώς και γεωφυσικές διεργασίες, όπως οι παλίρροιες.

⁷ Το ραδιόμετρο (AMR – Advanced Microwave Radiometer), μετράει την ακτινοβολία από την επιφάνεια της Γης σε τρείς διαφορετικές συχνότητες (18.7 23.8 και 34.0GHz). Οι μετρήσεις που καταγράφονται, συνδυάζονται για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας της ατμόσφαιρας σε υγρό στοιχείο. Μετά τον προσδιορισμό του υγρού στοιχείου, υπολογίζονται οι διορθώσεις στην καθυστέρηση μετάδοσης του σήματος του radar. Το όργανο παρέχεται από τη NASA. (CNES, CLS)

κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης και επικύρωσης των δεδομένων αλτιμετρίας (Mertikas, 2009).

Το ύψος στάθμης της θάλασσας (SSH), δεν είναι ένα μέγεθος που μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε για τη σύγκριση μετρήσεων δεδομένων αλτιμετρίας με ανεξάρτητο εξοπλισμό στην επιφάνεια της Γης, αφού το SSH αλλάζει για ένα σημείο της επιφάνειας της θάλασσας κατά τις χρονικές στιγμές διέλευσης του δορυφόρου. Έτσι, εισάγουμε το μέγεθος «Ανωμαλία της Στάθμης της Θάλασσας» (*Sea Level Anomaly – SLA*), ως εξής:

$$SLA(k) = SSH(k) - MSS(k)$$
(5.4)

όπου: **SSH(k)** είναι το SSH για το σημείο (k), που έχει προκύψει μετά την εφαρμογή όλων των διορθώσεων της *Σχέσης* (5.3)

MSS(k) (Mean Sea Surface - MSS) είναι η μέση στάθμη της θάλασσας στο σημείο (k), και δίνεται από ύψος του γεωειδούς N ως προς το ελλειψοειδές αναφοράς συν τη Μέση Δυναμική Τοπογραφία (Mean Dynamic Topography - MDT) αυτού του σημείου (k) (Σχέση (5.5).

$$MSS(k) = N(k) + MDT(k)$$
(5.5)

Έτσι, το **SLA** για ένα σημείο (k), δίνεται από την Σχέση (5.6):

$$SLA(k) = SSH(k) - N(k) - MDT(k)$$
(5.6)

Απόλυτη βαθμονόμηση πραγματοποιείται με εκτίμηση του SLA στο σημείο (k), με τη χρήση μέσων τιμών στο έδαφος. Αυτό απαιτεί μέτρηση της στάθμης της επιφάνειας της θάλασσας κάτω ακριβώς από την τροχιά του δορυφόρου, χρησιμοποιώντας εξοπλισμό όπως παλιρροιογράφους και GPS, προτιμώντας την ανοιχτή θάλασσα (μακριά από την ακτογραμμή).

Επίσης, το **SLA** για το σημείο (k₀) στο οποίο είναι τοποθετημένος ο παλιρροιογράφος, δίνεται από την *Σχέση* (5.7):

$$SLA(k_0) = SSH(k_0) - N(k_0) - MDT(k_0)$$
(5.7)

Έτσι λοιπόν, τελικά είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε το απόλυτο σφάλμα των μετρήσεων των δορυφόρων Jason-2 **(Bias)**, από την Σχέση (5.8):

$$Bias = Mesurement - Truth = SLA(k) - SLA(k_0)$$
(5.8)

Από τα παραπάνω, καθίσταται προφανές ότι η ακρίβεια στον προσδιορισμό του Bias, έγκειται στην ακρίβεια υπολογισμού των παραμέτρων των παραπάνω σχέσεων. Καθοριστικός παράγοντας στην ακρίβεια των υπολογισμών, αναδεικνύεται από τις σχέσεις αυτές, το ύψος **Ν** του γεωειδούς, του οποίου θα προσδιορίσουμε την αξιοπιστία για την περιοχή της Γαύδου, πάνω στα ίχνη των τροχιών του δορυφόρου Jason-2.

Στη συνέχεια δίνονται όλες οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται, μαζί με το σχήμα αναφοράς, συγκεντρωμένα, για ευκολότερη μελέτη και χρήση.

SSH(k) = H(k) - R(k)	(5.9)
SSH(k) = H(k) - R(k) + [Iono(k) + Wet(k) + Dry(k) + SSB(k)]	(5.10)
Corrected SSH(k) = SSH(k) + +[Solid Earth Tide(k) + Pole Tide(k) + Ocean Tide(k)]	(5.11)
MSS(k) = N(k) + MDT(k)	(5.12)
SLA(k) = SSH(k) - MSS(k)	(5.13)
SLA(k) = SSH(k) - N(k) - MDT(k)	(5.14)
$SLA(k_0) = SSH(k_0) - N(k_0) - MDT(k_0)$	(5.15)
$Bias = Mesurement - Truth = SLA(k) - SLA(k_0)$	(5.16)

Πίνακας 5.1 Σχέσεις υπολογισμού σφάλματος αλτιμέτρου



Εικόνα 5.3 Μεθοδολογία Βαθμονόμησης Δεδομένων Αλτιμετρίας (αντίγραφο του Εικόνα 5.2)

Κεφάλαιο 6. Πραγματοποίηση Μετρήσεων στη Θαλάσσια Περιοχή της Γαύδου

6.1.Προγραμματισμός Μετρήσεων

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων στην θαλάσσια περιοχή της Γαύδου, οργανώθηκαν τρείς διαφορετικές αποστολές μετρήσεων στην περιοχή.

- Η πρώτη αποστολή έγινε την <u>18^η Σεπτεμβρίου 2009</u>, με σκοπό την πραγματοποίηση μετρήσεων με κινηματικό GPS πάνω στο ίχνος της τροχιάς <u>No 109</u> του δορυφόρου Jason-2, βορειοανατολικά της Ν. Γαύδου.
- Η δεύτερη αποστολή πραγματοποιήθηκε την <u>27ⁿ Αυγούστου 2010</u>, με σκοπό την πραγματοποίηση μετρήσεων με κινηματικό GPS πάνω στο ίχνος της τροχιάς <u>No 18</u> του δορυφόρου Jason-2, νοτιοανατολικά της Ν. Γαύδου.
- 3. Η τρίτη αποστολή πραγματοποιήθηκε την <u>7^η Σεπτεμβρίου 2010</u>, με σκοπό την πραγματοποίηση μετρήσεων με κινηματικό GPS πάνω στο

ίχνος της τροχιάς <u>No 109</u> του δορυφόρου Jason-2, νοτιοδυτικά της Ν. Γαύδου.

6.2.Εξοπλισμός που Χρησιμοποιήθηκε

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε και εγκαταστάθηκε στην ξηρά ή προϋπήρχε εγκατεστημένος, ή ακόμη εγκαταστάθηκε από εμάς στην ξηρά ή στο σκάφος, παρατίθεται στις ακόλουθες ενότητες.

6.2.1.Υποδομές Βαθμονόμησης στην Κρήτη

Το 2004, εγκαταστάθηκε και λειτουργεί πλήρως και αδιάλειπτα, από το Πολυτεχνείο Κρήτης - Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων – Εργαστήριο Γεωδαισίας και Γεωπληροφορικής των Γεωεπιστημών GeoMatLab (Technical University of Crete), σταθμός για τη βαθμονόμηση radar δορυφόρων αλτιμετρίας, στο Νησί της Γαύδου. Ο σταθμός αυτός περιλαμβάνει δέκτες GPS, μετεωρολογικά και ωκεανογραφικά όργανα, παλιρροιογράφους, δορυφορικό σταθμό εκπομπής DORIS, αναμεταδότη μικροκυμάτων (microwave transponder), συστήματα επικοινωνίας για τη μετάδοση των δεδομένων, καθώς και συστήματα μόνιμης παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η επιλογή του σημείου εγκατάστασης και λειτουργίας του σταθμού στη Γαύδο, όπως έχουμε προαναφέρει, έγινε για εκμετάλλευση του γεγονότος ότι μπορεί να γίνει ταυτόχρονα βαθμονόμηση της ανιούσας και κατιούσας τροχιάς του δορυφόρου Jason-2, με τον ίδιο εξοπλισμό, αφού βρίσκεται κάτω από την διασταύρωση των τροχιών No 018 και O109 του δορυφόρου Jason-2, και κοντά την τροχιά No 571 του δορυφόρου Envisat, και μαζί με το γεγονός ότι οι μετρήσεις αλτιμετρίας δεν επηρεάζονται από ανακλάσεις του σήματος από στεριά, κάνουν τη Γαύδο ένα ιδανικό μέρος για βαθμονόμηση δορυφόρων αλτιμετρίας, όπως των Jason-1 & 2.

Στην Εικόνα 6.1, φαίνεται το ίχνος των τροχιών των δορυφόρων Jason-2, GFO και Εnvisat στην Περιοχή της Δυτικής Κρήτης και της Γαύδου, καθώς και το μόνιμο δίκτυο GNSS στις ίδιες περιοχές, όπως έχει αναπτυχθεί από το GeoMatLab.

Για επέκταση και ενδυνάμωση του σταθμού στη Γαύδο, παρόμοιοι σταθμοί εγκαταστάθηκαν στη Χρυσοσκαλίτισσα (CRS1), και στο Ροδάκινο (RDK1) της Κρήτης. Σε αυτούς τους σταθμούς είναι εγκατεστημένοι εκτός από παλιρροιογράφοι και δέκτες GPS. Το δίκτυο αυτό, συμπληρώνεται από άλλους δύο σταθμούς GPS, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στο χώρο του Πολυτεχνείο Κρήτης στα Χανιά, (TUC1, TUC2), ενώ άλλοι τρείς έχει προγραμματιστεί να εγκατασταθούν στη Δυτική Κρήτη σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο Βόρειας Καρολίνας, εκ των οποίων οι δύο λειτουργούν ήδη, ο ένας στο Σελί (SELI) και ο άλλος τη Σούγια (SUG1).



Εικόνα 6.1 Μόνιμο Δίκτυο GNSS και Τροχιές Δορυφόρων Αλτιμετρίας πάνω από Κρήτη και Γαύδο

6.2.2.Δέκτες GPS

Στο σταθμό βάσης στο λιμάνι του Καραβέ, υπάρχουν εγκατεστημένοι από το GeoMatLab, δύο δέκτες GNSS:

Όνομα Σταθμού	Μοντέλο GNSS (GPS)	Μοντέλο Κεραίας	
GVD7	Leica GRX1200GG PRO	Leica AX1202GG	
GVD8	Leica GNSSGPS 1200+	Leica AR25	

Πίνακας 6.1 Μόνιμα Εγκατεστημένα GPS των σταθμών GVD7 και GVD8 στη Γαύδο



Εικόνα 6.2 Μόνιμος Εξοπλισμός των σταθμών βάσης GVD7 και GVD8, με δέκτες Leica GPS1200+ series και κεραίες AR25 και AX1202GG

Οι δέκτες αυτοί είναι υψηλής ακριβείας και τελευταίας τεχνολογίας, με δυνατότητα όχι μόνο της λήψης των τριών συχνοτήτων του GPS L1 / L2 / L5, αλλά και άλλων δορυφορικών συστημάτων ναυσιπλοΐας όπως τα Glonass, Galileo και Compass. Οι κεραίες που τα συνοδεύουν είναι επίσης πολύ ευαίσθητες με ικανότητα απόκλισης πολυκλαδικών παρεμβολών και λήψης σημάτων δορυφόρων μικρής ανύψωσης. Εξ αυτών, ο σταθμός GVD8, χρησιμοποιήθηκε σαν σταθμός βάσης για την πραγματοποίηση κινηματικού GPS κατά τις μετρήσεις στη θαλάσσια περιοχή της Γαύδου.

Εκτός αυτών των δεκτών GPS, χρησιμοποιήθηκε και ένας δέκτης GPS Novatel Smart 6200, υψηλής ακρίβειας διπλής συχνότητας L1 / L2, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε σαν κινητός σταθμός εγκατεστημένος πάνω στο σκάφος με το οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Επίσης, για την πλοήγηση στη θάλασσα, χρησιμοποιήθηκαν GPS χειρός της Magellan.

6.2.3.Παλιρροιογράφοι

Στο σταθμό στο λιμάνι του Καραβέ, υπήρχαν τοποθετημένοι επίσης από το GeoMatLab, οι παλιρροιογράφοι KVR3 και KVR4, ενώ εγκαταστάθηκε ακόμη ένας μόνιμος παλιρροιογράφος, με όνομα KVR5, διαφορετικής τεχνολογίας μέτρησης από τους προηγούμενους, με σκοπό την επικύρωση των αποτελεσμάτων των δύο προηγούμενων. Αυτός ήταν το μοντέλο Valeport Tide Master, ο οποίος διαθέτει αισθητήρα πίεσης.

Όνομα Σταθμού	Τύπος	Μοντέλο GNSS (GPS)	Αισθητήρας - Καταγραφέας
KVR3	Radar	OTT Kalesto Sensor	OTT Duosens Data logger
KVR4	Ακουστικός	General Acoustics LogALevel	Sensor ULL6080 Data logger LCF2 LogALevel
KVR5	Πίεσης	ValePort Tide Master	ValePort Tide Master

Πίνακας 6.2 Μόνιμα Εγκατεστημένοι Παλιρροιογράφοι στο λιμάνι του Καραβέ της Γαύδου

Εκτός από αυτούς τους παλιρροιογράφους, άλλος ένας με αισθητήρα radar (Vegapuls 61), εγκαταστάθηκε πάνω στο σκάφος, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της απόστασης του σημείου αναφοράς μετρήσεων της κεραίας του GPS από την επιφάνεια της θάλασσας.

6.2.4.Λοιπός Εξοπλισμός

Ένα άλλο όργανο που είναι μόνιμα εγκατεστημένο στο ίδιο χώρο *(Εικόνα* 6.4), είναι και ένας μετεωρολογικός σταθμός Paroscientific MET4, υψηλής ακριβείας μετρήσεων, για μόνιμη καταγραφή θερμοκρασίας, πίεσης και σχετικής υγρασίας.



Εικόνα 6.3 Μετεωρολογικός σταθμός Paroscientific MET4

Εκτός όλων όσων προαναφέρθηκαν και αποτελούν τον βασικό εξοπλισμό, θα πρέπει να αναφερθεί, ότι στο χώρο εγκατάστασης των σταθμών υπάρχει και ο εξοπλισμός υποστήριξης, συλλογής και αποστολής των δεδομένων στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

Αρχικά, τα δεδομένα καταγράφονται είτε σε εσωτερικές μνήμες των διαφόρων συσκευών ή σε ειδικές καταγραφικές μονάδες. Στη συνέχεια, ειδικοί μικροϋπολογιστές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, ειδικά δομημένοι από το προσωπικό του εργαστηρίου, αναλαμβάνουν να στείλουν αυτά τα δεδομένα μέσω κινητής τηλεφωνίας 3G στο Πολυτεχνείο στα Χανιά.

Όλος ο εξοπλισμός, είναι εντελώς ανεξάρτητος από άποψη παροχής ενέργειας, αφού εκτός του ότι λειτουργεί με ενέργεια που παρέχεται από μια σειρά μπαταριών που του εξασφαλίζουν μεγάλη αυτονομία, οι μπαταρίες αυτές φορτίζονται από φωτοβολταϊκά πάνελ, καθιστώντας το όλο σύστημα πραγματικά αυτάρκες σε ενέργεια.



Εικόνα 6.4 Θέση εγκατάστασης σταθμών στο λιμάνι του Καραβέ στη Γαύδο.

Κατά τη διαδικασία των μετρήσεων, ήταν φυσικά επιβεβλημένη η χρήση φορητού υπολογιστή, τόσο για τη σωστή αρχική ρύθμιση και τον προγραμματισμό όλου του εξοπλισμού, την πραγματοποίηση δοκιμών, αλλά και τελικά την ανάκτηση των δεδομένων που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

6.3.Εγκατάσταση των οργάνων μέτρησης στο σκάφος

Πρωταρχική ενέργεια, ήταν η εγκατάσταση πάνω στο σκάφος του δέκτη GPS και του παλιρροιογράφου. Αυτό απαιτούσε την κατασκευή ειδικού στελέχους το οποίο θα στηριζόταν με συγκεκριμένο μη μόνιμο τρόπο (προσωρινό – που να αφαιρείται μετά το πέρας των μετρήσεων χωρίς να αφήνει φθορές στο σκάφος) πάνω στο σκάφος, αλλά θα είχε και τη δυνατότητα να εγκατασταθούν πάνω του τόσο η κεραία του GPS, όσο και το radar του παλιρροιογράφου *(Εικόνα 6.5)*. Πρόκειται για μια ιδιοκατασκευή που μελετήθηκε από την ομάδα του εργαστηρίου και κατασκευάστηκε από εξωτερικό συνεργάτη.



Εικόνα 6.5 Εγκατάσταση δέκτη GPS και παλιρροιογράφου στο σκάφος

Στη συνέχεια συνδέθηκαν το GPS με την κεραία του και ο παλιρροιογράφος με το radar του, εξασφαλίστηκε η παροχή συνεχούς τάσης από εξωτερική μπαταρία και ξεκίνησε η διαδικασία ρύθμισής τους. Η ρύθμιση περιλάμβανε κατ΄ αρχήν τον συγχρονισμό των ρολογιών τους και μετά τη ρύθμιση της συχνότητας καταγραφής η οποία ορίστηκε στο 0,5Hz (μια μέτρηση ανά δύο δευτερόλεπτα). Αφού ολοκληρώθηκε επιτυχώς η διαδικασία, και διαπιστώθηκε η εύρυθμη λειτουργία τους, ακολούθησε η τοποθέτηση των οργάνων μέσα στο σκάφος, σε τέτοια θέση ώστε να είναι εύκολα προσβάσιμα από τον χρήστη που θα αναλάμβανε τον έλεγχο λειτουργίας τους πάνω στο σκάφος (ένας από την ομάδα μας), αλλά και σε θέση που να είναι προστατευμένα από τον κυματισμό.

Πριν την έναρξη των μετρήσεων, απαραίτητη ήταν η μέτρηση της διαφοράς του ύψους του σημείου μέτρησης της κεραίας του GPS και του σημείου από το οποίο γινόταν η μέτρησης της στάθμης της θάλασσας του παλιρροιογράφου (σημείο αναφοράς του παλιρροιογράφου), ώστε μετά την καταγραφή των δεδομένων από τις δύο συσκευές να είμαστε σε θέση να κάνουμε αναγωγή στο ίδιο σημείο, δηλαδή στην επιφάνεια της θάλασσας (Εικόνα 6.6).



Εικόνα 6.6 Σχηματική αναπαράσταση (τομή) της εγκατάστασης των οργάνων στο σκάφος, και μέτρηση διαφοράς ύψους σημείου μέτρησης του GPS με σημείο μέτρησης παλιρροιογράφου.

6.4.Πραγματοποίηση Μετρήσεων

Την 18^η Σεπτεμβρίου του 2009, πραγματοποιήθηκε η πρώτη αποστολή συλλογής μετρήσεων με κινηματικό GPS και παλιρροιογράφο στην Βορειοανατολική θαλάσσιας περιοχής της Γαύδου. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε φουσκωτό σκάφος, ξεκινώντας από το λιμάνι του Καραβέ μέχρι το Ροδάκινο στην Νότια Κρήτη και επιστροφή (κυανή γραμμή στην *Εικόνα 6.8*), και πάντα ακολουθώντας το ίχνος της τροχιάς N° 109 του δορυφόρου Jason-2. Η διαδρομή που ακολουθήθηκε πάνω στο ίχνος της τροχιάς, είχε μήκος 40Km. Σταθμός αναφοράς του κινηματικού GPS ορίστηκε ο GVD7 στη Γαύδο, με διάστημα καταγραφής δεδομένων δύο δευτερόλεπτα, όπως και τα δύο όργανα πάνω στο σκάφος. Η εγκατάσταση του εξοπλισμού πάνω στο σκάφος έγινε σύμφωνα με τα πρότυπα που περιγράφηκαν στην Παράγραφο 6.3. Η ταχύτητα πλεύσης ορίστηκε 10κόμβους/ώρα, και ο καιρός κατά την εκκίνηση των μετρήσεων ήταν καλός με τη θάλασσα ελαφρά κυματώδη. Μετά την άφιξη στο Ροδάκινο της Κρήτης, δυστυχώς οι καιρικές συνθήκες επιδεινώθηκαν, και έκαναν την επιστροφή στο λιμάνι του Καραβέ της Γαύδου εσπευσμένη, με αποτέλεσμα να μην γίνει λήψη μετρήσεων κινηματικού GPS με την ταχύτητα που είχε προγραμματιστεί, και οι μετρήσεις που λήφθηκαν να είναι πολύ θορυβώδεις εξ αιτίας του έντονου κυματισμού.

Την 27⁹ Αυγούστου του 2010, πραγματοποιήθηκε η δεύτερη περίοδος μετρήσεων νοτιοανατολικά της Γαύδου, πάνω στο ίχνος της τροχιάς Νο 018 του δορυφόρου Jason-2 (κίτρινη γραμμή στην *Εικόνα 6.8*). Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο ίδιος με την προηγούμενη αποστολή. Η εκκίνηση ήταν πάλι από το λιμάνι του Καραβέ, και ακολουθήθηκε πορεία πάνω στο ίχνος της τροχιάς μήκους 19Km. Ο καιρός ήταν εξαιρετικός και όλα πραγματοποιήθηκαν κατά το πρόγραμμα.



Εικόνα 6.7 Εκκίνηση από τα Σφακιά με προορισμό το λιμάνι του Καραβέ στη Γαύδο, την 09 Σεπτεμβρίου 2010 7:24am

Κεφάλαιο 6. Πραγματοποίηση Μετρήσεων στη Θαλάσσια Περιοχή της Γαύδου 6.4 Πραγματοποίηση Μετρήσεων



Εικόνα 6.8 Πορεία που ακολουθήθηκε κατά τις ημέρες μετρήσεων στη θαλάσσια περιοχή της Γαύδου

Κεφάλαιο 6. Πραγματοποίηση Μετρήσεων στη Θαλάσσια Περιοχή της Γαύδου 6.4 Πραγματοποίηση Μετρήσεων

Τέλος, την 7^η Σεπτεμβρίου του 2010, πραγματοποιήθηκε η τρίτη αποστολή, για την πραγματοποίηση μετρήσεων, αυτή τη φορά Νοτιοδυτικά της Γαύδου (*Εικόνα* 6.7), πάνω στο ίχνος της τροχιάς Νο 109 του δορυφόρου Jason-2 (πράσινη γραμμή στην *Εικόνα 6.8*). Η εκκίνηση έγινε πάλι από το λιμάνι του Καραβέ, η ταχύτητα πλεύσης ρυθμίστηκε περίπου στους 10κόμβους/ώρα και η απόσταση που διανύθηκε πάνω στο ίχνος της τροχιάς ήταν 26Km. Οι καιρικές συνθήκες ήταν ευνοϊκές όσον αφορά την ηλιοφάνεια και τη ζέστη που άγγιζε τους 40°C, αλλά ο αέρας έντασης 5 Beaufort καθιστούσε την αποστολή δύσκολη (ειδικά για τόσο μικρό σκάφος μήκους 7m). Κατά την επιστροφή, πραγματοποιήθηκε και δεκάλεπτη στάση με τα όργανα σε λειτουργία, για λήψη μετρήσεων δίπλα στους παλιρροιογράφους KVR3, KVR4 και KVR5.

Με την τρίτη αποστολή μετρήσεων στη θαλάσσια περιοχή της Γαύδου, ολοκληρώθηκε το σχέδιο συλλογής μετρήσεων κινηματικού GPS, έχοντας συλλέξει αρκετές μετρήσεις. Επόμενο βήμα η επεξεργασία των μετρήσεων που καταγράφηκαν, με σκοπό τον έλεγχο της αξιοπιστίας του γεωειδούς για χρήση του στη βαθμονόμηση δορυφόρων αλτιμετρίας.

Κεφάλαιο 7. Επεξεργασία των Μετρήσεων

7.1. Υπολογισμός Συντεταγμένων των Σταθμών Αναφοράς

Πρωταρχική ενέργεια μετά την καταφόρτωση των δεδομένων από τα όργανα στα υπολογιστικά συστήματα του εργαστηρίου, ήταν ο προσδιορισμός των ακριβών συντεταγμένων των σταθμών βάσης μας, του GVD7 και GVD8, κατά τις ημερομηνίες των μετρήσεων, ως προς το πλαίσιο αναφοράς ITRF2005 (όπως έχει αναλυθεί στην Παράγραφο 2.3). Οι γεωγραφικές θέσεις των σταθμών αναφοράς φαίνονται στην Εικόνα 6.4.

Ο υπολογισμός των πραγματικών συντεταγμένων των σταθμών αυτών, έγινε ως προς τις συντεταγμένες του ήδη γνωστού γεωδαιτικά σταθμού βάσης, του GVD0, στο οποίο υπάρχει εγκατεστημένο GPS που καταγράφει μόνιμα, οπότε υπάρχουν μετρήσεις για τις ημέρες που μας ενδιαφέρει. Επομένως, αρχικά πρέπει να προσδιορίσουμε τις συντεταγμένες του σταθμού GVD0 για τις ημερομηνίες ενδιαφέροντος, και μετά, αναφορικά με το GVD0, τις συντεταγμένες των άλλων σταθμών αναφοράς. Οι συντεταγμένες του σταθμού GVD0 και οι ταχύτητες μετακίνησής του ως προς το πλαίσιο αναφοράς ITRF2005 την χρονική στιγμή (epoch) 2009.0, όπως υπολογίστηκαν από την ομάδα του εργαστηρίου GeoMatLab (Πίνακας 7.1) (Mertikas, 2009) (Géographique National France) φαίνονται στον Πίνακα 7.2.

* General statistics for site GVD0_GPS (2007.0589 - 2009.5247)			
* enu nrms, wrms(weighted mean scatter): 1.094 0.860 0.830 1.846 1.349 5.037 GVD0_GPS			
EST_BIAS 24.1089 34.8385 0.000 -0.007 -0.007 0.082 1.0000 GVD0_GPS 2009.0000 2200.0000			
NOR_BIAS 24.1089 34.8385 0.000 -0.031 -0.031 0.076 1.0000 GVD0_GPS 2009.0000 2200.0000			
VER_BIAS 24.1089 34.8385 0.000 -0.003 -0.003 0.297 1.0000 GVD0_GPS 2009.0000 2200.0000			
EST_VELO 24.1089 34.8385 0.000 7.702 7.702 0.082 1.0000 GVD0_GPS 2007.0589 2009.5247			
NOR_VELO 24.1089 34.8385 0.000 -13.057 -13.057 0.077 1.0000 GVD0_GPS 2007.0589 2009.5247			
VER_VELO 24.1089 34.8385 0.000 -1.218 -1.218 0.295 0.9998 GVD0_GPS 2007.0589 2009.5247			
lsq_velo 24.1089 34.8385 7.702 -13.057 0.089 0.066 -0.0727 -1.218 0.245 0.0340 -0.0419 GVD0_GPS 2007.0589 2009.5247			
lsq_coor GVD0_GPS tser_fit N34 50 18.580117 E 24 6 31.906585 123.87605 0.0077 -0.0131 -0.0012 2009.0000 2007.0589 2009.5247			
coor_xyz GVD0_GPS 4783636.34385 2140712.04074 3623246.23666 2009.0000			
velo_xyz 24.1089 34.8385 2.750 9.669 -11.413 0.227 0.129 0.177 GVD0_GPS			



Αρχικές Συντεταγμένες GVD0 στο πλαίσιο αναφοράς ITRF2005 την epoch 2009.0		Ταχύτητα Μετακίνησης (mm/yr)	
x	4783636,344	dX	3,444
Y	Y 2140712,041		10,522
Z 3623246,237		dZ	-9,802

Πίνακας 7.2 Αρχικές Συντεταγμένες GVD0 και Ταχύτητες Μετακίνησης ως προς το Πλαίσιο ITRF2005

Επίσης, για τις συγκεκριμένες ημέρες, χρειαζόμαστε και τις ακριβείς (τελικές) τροχιές των δορυφόρων του GPS, οπότε πρέπει να εκφραστούν οι ημερομηνίες και σε χρόνο GPS. Για το ITRF, έχουμε εξηγήσει το σύστημα αναφοράς των ημερομηνιών, ενώ για το GPS παίρνουμε τα δεδομένα από το GNSS Calendar (Giel). Έτσι, οι ημερομηνίες των μετρήσεων, εκφράζονται στο σύστημα αναφοράς ITRF2005 για τις ημερομηνίες του ημερολογίου του GPS, ως εξής (Πίνακας 7.3):

7.1 Υπολογισμός Συντεταγμένων τ	ων Σταθμών Αναφοράς
---------------------------------	---------------------

Ημερομηνία Μετρήσεων	Χρονική Στιγμή για το ITRF2005 (Epoch) και χρόνος από 2009.0 (years)	Χρονική Στιγμή για το GPS (GPS Week)
18 Σεπτεμβρίου 2009	261 ^η μέρα του έτους 2009 71% του έτους 2009 epoch 2009.71 0,715068493 (years from 2009.0)	Εβδομάδα GPS 1549 & ημέρα 5 ^η GPS Week 1549:5
27 Αυγούστου 2010	239 ^η μέρα του έτους 2010 65% του έτους 2010 epoch 2010.65 1,654794521 (years from 2009.0)	Εβδομάδα GPS 1598 & ημέρα 5 ^η GPS Week 1598:5
09 Σεπτεμβρίου 2010	252 ^η μέρα του έτους 2010 69% του έτους 2010 epoch 2010.69 1,690410959 (years from 2009.0)	Εβδομάδα GPS 1600 & ημέρα 4 ^η GPS Week 1600:4

Πίνακας 7.3 Χρόνοι αναφοράς για το ITRF2005 και το GPS

Έχοντας τις συντεταγμένες (Χ, Υ, Ζ) του σημείου GVD0 στο πλαίσιο αναφοράς ITRF2005, τις ταχύτητες μετακίνησης του (dX, dY, dZ), και τις χρονικές στιγμές για τις οποίες θέλουμε τις ακριβής συντεταγμένες, υπολογίζονται οι νέες του συντεταγμένες από τη *Σχέση (7.1),*

$$Coords_{xxxx.yy} = Coords_{2009.0} + \left(Velocity \times \left(Years + \frac{Day \ of \ Year}{365}\right)\right)$$
(7.1)

για τις χρονικές στιγμές (Πίνακας 7.3) των μετρήσεών μας (Πίνακας 7.4).

Συντεταγμένες σημείου GVD0 την epoch 2009.0 (m		Ταχύτητες	Νέες Συντεταγμένες σημείου GVD0		
		Μετακίνησης του GVD0 (mm/year)	την epoch 2009.71	την epoch 2010.65	την epoch 2010.69
x	4783636,344	3,444	4783636,347	4783636,350	4783636,350
Y	2140712,041	10,522	2140712,049	2140712,059	2140712,059
z	3623246,237	-9,802	3623246,230	3623246,220	3623246,220

Πίνακας 7.4 Συντεταγμένες Σημείου GVD0 τις ημερομηνίες των μετρήσεων

Μετά τους υπολογισμούς των νέων συντεταγμένων, είναι εμφανείς (Πίνακας 7.4) οι μικροδιαφορές θέσης που προκύπτουν για το GVD0, ενώ για τις δύο τελευταίες ημερομηνίες οι διαφορές είναι αμελητέες (διαφορά σε δέκατα του χιλιοστού – τέταρτο δεκαδικό), οπότε θα χρησιμοποιηθούν οι ίδιες συντεταγμένες του σταθμού αναφοράς μας για τις δύο χρονικές στιγμές 2010.65 και 2010.69.

Στη συνέχεια της επεξεργασίας, λαμβάνονται από το International GNSS Service - IGS (NASA, JPL) οι τελικές ακριβείς τροχιές των δορυφόρων του GPS (*GPS Final Orbits*), οι οποίες δίνονται στην εξής μορφή:

- igs15495.sp3.Z⁸ (ημέρα 5^η της GPS εβδομάδος 1549) (NASA, JPL)
- igs15985.sp3.Z (ημέρα 5^η της GPS εβδομάδος 1598) (NASA, JPL)
- igs16004.sp3.Z (ημέρα 4^η της GPS εβδομάδος 1600 (NASA, JPL)

⁸ igsnnnnx.aaa.z, όπουigs = International GNSS Service

nnnn = εβδομάδα του GPS, π.χ., 1549

x = ημέρα της εβδομάδος, Κυριακή = 0, ..., Σαββάτο = 6, Εβδομάδα = 7

aaa = τύπος αρχείου, eph (SP3), sum, erp (erp = παρ/τροι περιστροφής Γης) Ζ = συμπιεσμένο αρχείο
Επίσης από τον FTP Server του Εργαστηρίου GeoMatLab (Technical University of Crete) καταφορτώθηκαν τα αρχεία δεδομένων των σταθμών GPS GVD0, GVD7 και GVD8, για τις ημερομηνίες των μετρήσεων στη Γαύδο.

Έχοντας λοιπόν

- τις μετρήσεις των GPS για τα GVD0, GVD7 και GVD8
- τη διορθωμένη θέση του GVD0 στο ITRF2005 για τις ημερομηνίες μετρήσεων
- και τις ακριβείς δορυφορικές τροχιές του GPS

πραγματοποιήθηκε επίλυση στατικού προσδιορισμού θέσης με το πρόγραμμα GNSS Solutions της Ashtech *(Εικόνα 7.1)* (Ashtech), για τον υπολογισμό:

- της βάσης GVD0 GVD7 για την 18 Σεπτεμβρίου 2009
- της βάσης GVD0 GVD8 για την 27 Αυγούστου 2010
- και της βάσης GVD0 GVD8 για την 09 Σεπτεμβρίου 2010.

Εκτός φυσικά από τις βάσεις (διανύσματα), υπολογίζονται οι τελικές ζητούμενες συντεταγμένες των σταθμών GVD7 και GVD8 για τις εν λόγω ημέρες.

About G	NSS Solutions	
2	GNSS Solutions 3.10.13 Copyright © 2010 Ashtech. All rights reserved.	
	Available software options :	
	Real-time Job Transfer : Yes L1 Post-Processing : Yes L1/L2 Post-Processing : Yes - 30 day(s)	
	Click here to unlock options	
	Visit us on the Web <u>www.ashtech.com</u>	

Εικόνα 7.1 Περί του Προγράμματος GNSS Solutions

Παράλληλα χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Matlab *(Εικόνα 7.2)* (The MathWorks, Inc.) για τις απαραίτητες μετατροπές της μορφής των συντεταγμένων από τη μορφή (x, y, z) σε (φ, λ, h) και αντίστροφα ανάλογα με τη χρήση.



Εικόνα 7.2 Περί του Προγράμματος Matlab

Έτσι, οι τελικές συντεταγμένες των σταθμών αναφοράς, στο πλαίσιο αναφοράς ITRF2005, έχουν ως εξής:

Συντεταγμένες Σταθμών Αναφοράς (φ, λ, h) την 18 Σεπ. 2009 – epoch 2009.71					
Name	Latitude φ	Longitude λ	Height		
GVD0	34° 50' 18,57979"N	24° 06' 31,90681"E	123,875		
GVD7	34° 50' 52,74635"N	24° 07' 11,20418"E	20,121		

Πίνακας 7.5 Συντεταγμένες Σταθμών Αναφοράς την 18 Σεπ. 2009

7.1 Υπολογισμός Συντεταγμένων των Σταθμών Αναφοράς

Συντεταγμένες Σταθμών Αναφοράς (φ, λ, h) την 27 Αυγ. 09 Σεπ. 2010 και 07 Σεπ. 2010 – epoch 2010.65 & 2010.69					
Name	Name Latitude φ Longitude λ				
GVD0	34° 50' 18,57946"N	24° 06' 31,90714"E	123,875		
GVD8	34° 50' 52,61350"N	24° 07' 11,39825"E	20,121		

Πίνακας 7.6 Συντεταγμένες Σταθμών Αναφοράς την 27 Αυγ. 2010 και 07 Σεπ. 2010

7.2.Επεξεργασία μετρήσεων Κινηματικού GPS

Για την επεξεργασία των δεδομένων του συστήματος GPS, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα GNSS Solutions, αλλά αυτή τη φορά για τις μετρήσεις που συλλέχθηκαν κατά το κινηματικό GPS με βάση το GVD7 την πρώτη φορά, και το GVD8 τις επόμενες δύο (με τις συνταγμένες που υπολογίστηκαν προηγουμένως).

Κατά την επεξεργασία των μετρήσεων του GPS, αποδόθηκε σε κάθε μέτρηση, ονομασία με το πρόθεμα ROV και έναν αύξοντα αριθμό, και για κάθε τέτοια μέτρηση υπολογίστηκε μετά την επεξεργασία, το γεωγραφικό μήκος και πλάτος, το ύψος ως προς το ελλειψοειδές αναφοράς WGS84, αλλά και τη διακύμανση (dx, dy) ως προς το σταθμό βάσης μας, καθώς και την απόσταση από αυτόν.

Κατά την επεξεργασία έχουμε τη δυνατότητα αφαίρεσης του ύψους της κεραίας του GPS από τη θέση λήψης μετρήσεων του παλιρροιογράφου, οπότε τα αποτελέσματα της επεξεργασίας θα είναι σημεία στο σημείο λήψεως μετρήσεων του παλιρροιογράφου που ήταν εγκατεστημένος πάνω στο σκάφος σύμφωνα με το (Εικόνα 6.5).

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων του GPS, που περιλαμβάνουν το όνομα της μέτρησης (*Name*), τη χρονική στιγμή λήψης της μέτρησης σε UTC (*Time*), τις συντεταγμένες του σημείου μέτρησης (φ, λ, h) οι μοίρες σε δεκαδική μορφή και το *h* σε μέτρα, καθώς και η απόσταση από τον εκάστοτε σταθμό αναφοράς σε χιλιόμετρα (*Proc. Length ROVR*-GVDx*), δίδονται ξεχωριστά σε πίνακες ανά περίοδο μετρήσεων. Εξ αιτίας του μεγάλου πλήθους των μετρήσεων (δεκάδες χιλιάδες), ενδεικτικά παρουσιάζονται μερικές αρχικές ενδιάμεσες και τελικές μετρήσεις σύμφωνα με την περιγραφή που δόθηκε, και ανάλογα με τη διαδρομή που ακολουθήθηκε.

7.2.1.Επεξεργασία 1^{ης} Περιόδου Μετρήσεων

Για την πρώτη περίοδο μετρήσεων, την 18 Σεπτεμβρίου 2009, ακολουθήθηκε η διαδρομή από το λιμάνι του Καραβέ της Γαύδου έως το Ροδάκινο της Νότιας Κρήτης, και επιστροφή πάλι στον Καραβέ, και σημειώνεται με μπλε γραμμή στην *Εικόνα 7.3*.





Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων του GPS, τα δεδομένα που καταγράφηκαν κατά την επιστροφή, ήταν πολύ θορυβώδη, και αποκλείστηκαν από την επεξεργασία. Αυτό συνέβηκε διότι επικράτησαν άσχημες καιρικές συνθήκες στην περιοχή, υπήρχε υψηλός κυματισμός, και εκτός αυτού, η επιστροφή στη βάση μας (λιμάνι του Καραβέ) κρίθηκε ότι έπρεπε να επισπευτεί, οπότε δεν υπήρχε ούτε ο απαραίτητος όγκος δεδομένων που απαιτούνταν, αφού η ταχύτητα επιστροφής ήταν μεγάλη. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας δίνονται στον Πίνακα 7.7:

Name	Time	Longitude λ	Latitude φ	h (WGS84)	Baseline length (Km)
ROVER1	7:38:06	24,1287876667	34,8593408278	17,421	1,505
ROVER2	7:38:08	24,1287974833	34,8594090417	17,270	1,512
ROVER3	7:38:10	24,1288071194	34,8594729444	17,257	1,519
ROVER4	7:38:12	24,1288178167	34,8595356556	17,214	1,525
ROVER5	7:38:14	24,1288290222	34,8595959361	17,168	1,531
ROVER6	7:38:16	24,1288413889	34,8596511000	17,068	1,537
ROVER7	7:38:18	24,1288525056	34,8597066667	17,223	1,543
ROVER8	7:38:20	24,1288676000	34,8597671694	17,020	1,549
ROVER9	7:38:22	24,1288848583	34,8598267778	17,153	1,555
ROVER10	7:38:24	24,1289034472	34,8598842833	17,226	1,562
ROVER3610	10:37:22	24,3189772583	35,1877442500	21,998	41,849
ROVER3611	10:37:24	24,3189863111	35,1877543500	21,985	41,850
ROVER3612	10:37:26	24,3190008611	35,1877661694	21,965	41,852
ROVER3613	10:37:28	24,3190264056	35,1877821833	21,968	41,854
ROVER3614	10:37:30	24,3190634583	35,1877952556	21,929	41,857
ROVER3615	10:37:32	24,3191054389	35,1877987444	21,970	41,859
ROVER3616	10:37:34	24,3191492528	35,1877900889	21,964	41,860
ROVER3617	10:37:36	24,3191940361	35,1877681389	21,884	41,860
ROVER3618	10:37:38	24,3192325028	35,1877324056	21,887	41,858
ROVER3619	10:37:40	24,3192648111	35,1876801778	21,890	41,854
ROVER3620	10:37:42	24,3192863722	35,1876172111	21,869	41,848
ROVER3621	10:37:44	24,3192997250	35,1875500167	21,823	41,842
ROVER3622	10:37:46	24,3193041778	35,1874973500	21,896	41,837
ROVER3623	10:37:48	24,3193066500	35,1874555333	22,004	41,833
ROVER3624	10:37:50	24,3193095611	35,1874208361	21,998	41,830
ROVER3625	10:37:52	24,3193132306	35,1873924167	22,005	41,827
ROVER3626	10:37:54	24,3193183667	35,1873677028	22,006	41,825
ROVER4694	11:50:44	24,1196617639	34,8478982278	17,053	0,015
ROVER4695	11:50:46	24,1196599250	34,8478976889	17,035	0,015
ROVER4696	11:50:48	24,1196585361	34,8478972250	17,018	0,015
ROVER4697	11:50:50	24,1196571361	34,8478962750	17,047	0,015
ROVER4698	11:50:52	24,1196554917	34,8478955667	17,016	0,015
ROVER4699	11:50:54	24,1196541806	34,8478951056	17,048	0,015
ROVER4700	11:50:56	24,1196528361	34,8478942528	17,083	0,016
ROVER4701	11:50:58	24,1196520111	34,8478937139	17,060	0,016
ROVER4702	11:51:00	24,1196515667	34,8478930500	17,062	0,016
ROVER4703	11:51:02	24,1196514000	34,8478925000	17,064	0,016
ROVER4704	11:51:04	24,1196515500	34,8478921222	17,072	0,016
ROVER4705	11:51:06	24,1196513639	34,8478915694	17,038	0,016
ROVER4706	11:51:08	24,1196518278	34,8478916139	17,072	0,016
ROVER4707	11:51:10	24,1196521444	34,8478914083	17,026	0,016
ROVER4708	11:51:12	24,1196529056	34,8478915750	17,044	0,016

Πίνακας 7.7 Αποτελέσματα Κινηματικού GPS της 18 Σεπ. 2009 στο ίχνος της τροχιάς Νο 109

Στη συνέχεια δίνεται το διάγραμμα του γεωγραφικού πλάτους συναρτήσει του γεωγραφικού μήκους, για τη διαδρομή που ακολουθήθηκε (Γράφημα 7.1).



Γράφημα 7.1 Γεωγραφικό Πλάτος συναρτήσει Γεωγραφικού Μήκους στο Βόρειο Τμήμα της τροχιάς Νο 109

7.2.2.Επεξεργασία 2^{ης} Περιόδου Μετρήσεων

Η δεύτερη περίοδος μετρήσεων πραγματοποιήθηκε την 27 Αυγούστου του 2010, με εκκίνηση το λιμάνι του Καραβέ της Γαύδου, και κατεύθυνση Νότιο – Νοτιοανατολικά, πάνω στο ίχνος της τροχιάς Νο 018 του δορυφόρου Jason-2, και σε απόσταση 25 χιλιομέτρων από τη βάση μας (Εικόνα 7.4).



Εικόνα 7.4 2^η Περίοδος Μετρήσεων την 27 Αυγούστου του 2010 Νοτιοανατολικά της Ν. Γαύδου

Σε αυτή την περίοδο μετρήσεων, όλα πραγματοποιήθηκαν κατά το πρόγραμμα, και τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων του GPS, δίνονται στον Πίνακα 7.8.

Name	Time	Longitude λ	Latitude φ	h (WGS84)	Baseline length (Km)
ROVR1	5:57:12	24,1185264139	34,8476621722	16,811	0,124
ROVR2	5:57:14	24,1185265306	34,8476589472	16,846	0,124
ROVR3	5:57:16	24,1185266083	34,8476554250	16,763	0,124
ROVR4	5:57:18	24,1185268472	34,8476519528	16,793	0,124
ROVR5	5:57:20	24,1185266861	34,8476483528	16,778	0,124
ROVR6	5:57:22	24,1185266361	34,8476449667	16,868	0,124
ROVR7	5:57:24	24,1185267139	34,8476412778	16,859	0,124
ROVR8	5:57:26	24,1185263167	34,8476376278	16,845	0,124
ROVR9	5:57:28	24,1185264944	34,8476347028	16,864	0,125
ROVR10	5:57:30	24,1185257389	34,8476308417	16,817	0,125
ROVR11	5:57:32	24,1185256028	34,8476274750	16,813	0,125
ROVR12	5:57:34	24,1185251500	34,8476245833	16,826	0,125
ROVR13	5:57:36	24,1185243389	34,8476209583	16,780	0,125
ROVR14	5:57:38	24,1185238806	34,8476178889	16,847	0,125
ROVR15	5:57:40	24,1185229056	34,8476147028	16,868	0,126
ROVR16	5:57:42	24,1185224222	34,8476114889	16,788	0,126
ROVR4360	8:22:30	24,1622261833	34,6318585361	13,264	24,284
ROVR4361	8:22:32	24,1622207222	34,6318422917	12,419	24,286
ROVR4362	8:22:34	24,1622239528	34,6318358667	12,883	24,287
ROVR4363	8:22:36	24,1622253861	34,6318163306	13,158	24,289
ROVR4364	8:22:38	24,1622223278	34,6318014083	12,078	24,291
ROVR4365	8:22:40	24,1622269111	34,6317949861	13,109	24,291
ROVR4366	8:22:42	24,1622224778	34,6317763306	12,723	24,293
ROVR4367	8:22:44	24,1622243528	34,6317634111	12,391	24,295
ROVR4368	8:22:46	24,1622261083	34,6317561139	13,100	24,296
ROVR4369	8:22:48	24,1622232667	34,6317396778	13,098	24,297
ROVR4370	8:22:50	24,1622233472	34,6317259222	12,402	24,299
ROVR4371	8:22:52	24,1622218889	34,6317189694	13,841	24,300
ROVR4372	8:22:54	24,1622172194	34,6316893667	12,869	24,303
ROVR4373	8:22:56	24,1622241500	34,6316825778	12,816	24,304
ROVR4374	8:22:58	24,1622219278	34,6316669194	12,959	24,305
ROVR4375	8:23:00	24,1622227000	34,6316514944	12,893	24,307
ROVR4376	8:23:02	24,1622269333	34,6316441444	12,865	24,308
ROVR4377	8:23:04	24,1622209917	34,6316259000	13,137	24,310
ROVR4378	8:23:06	24,1622252333	34,6316151889	12,936	24,311
ROVR4379	8:23:08	24,1622285333	34,6316027333	12,782	24,313
ROVR4380	8:23:10	24,1622236556	34,6315889917	12,602	24,314
ROVR4381	8:23:12	24,1622290417	34,6315792806	12,567	24,315
ROVR4382	8:23:14	24,1622232194	34,6315643194	13,301	24,317

Πίνακας 7.8 Αποτελέσματα Κινηματικού GPS της 27 Αυγ. 2010 στο ίχνος της τροχιάς Νο 018

Παρακάτω εμφανίζεται το *Γράφημα 7.2* του γεωγραφικού πλάτους συναρτήσει του γεωγραφικού μήκους, για την εν λόγω διαδρομή, όπως προκύπτει από τα δεδομένα του GPS.



Γράφημα 7.2 Γεωγραφικό Πλάτος συναρτήσει Γεωγραφικού Μήκους στο Νότιο Τμήμα της τροχιάς Νο 018

7.2.3.Επεξεργασία 3^{ης} Περιόδου Μετρήσεων

Η τρίτη περίοδος μετρήσεων πραγματοποιήθηκε την 07 Σεπτεμβρίου 2010, ξεκινώντας από το λιμάνι του Καραβέ της Γαύδου, και κινούμενοι Νότιο -Νοτιοδυτικά, πάνω στο ίχνος της τροχιάς Νο 109 του δορυφόρου Jason-2 (Εικόνα 7.5). Ο στόχος ήταν να καλυφθούν 30 χιλιόμετρα, όπως και πραγματοποιήθηκε.



Εικόνα 7.5 3^η Περίοδος Μετρήσεων την 07 Σεπτεμβρίου του 2010

Η επεξεργασία των μετρήσεων του GPS, έγινε με σταθμό αναφοράς το GVD8 όπως έχει προαναφερθεί, και αφού δεν λήφθηκαν υπ' όψιν οι μετρήσεις από το λιμάνι του Καραβέ έως την άφιξη πάνω στο ίχνος της τροχιάς No 109, τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον Πίνακα 7.9.

7.2 Επεξεργασία μετρήσεων Κινηματικού GPS

Name	Time	Longitude λ	Latitude φ	h (WGS84)	Baseline length (Km)
ROVA804	06:45:50	24,1199741944	34,8004654389	15,783	5,268
ROVA805	06:45:52	24,1198929306	34,8005023833	15,838	5,264
ROVA806	06:45:54	24,1198103111	34,8005403306	15,733	5,259
ROVA807	06:45:56	24,1197269889	34,8005789833	15,741	5,255
ROVA808	06:45:58	24,1196463139	34,8006182361	15,811	5,251
ROVA809	06:46:00	24,1195651361	34,8006543333	15,925	5,247
ROVA810	06:46:02	24,1194824611	34,8006902722	15,882	5,243
ROVA811	06:46:04	24,1194009194	34,8007259556	15,830	5,239
ROVA812	06:46:06	24,1193216639	34,8007600556	15,881	5,235
ROVA813	06:46:08	24,1192445361	34,8007917139	15,779	5,232
ROVA814	06:46:10	24,1191678833	34,8008233500	15,883	5,228
ROVA815	06:46:12	24,1190892806	34,8008553861	15,777	5,225
ROVA816	06:46:14	24,1190098306	34,8008868500	15,802	5,221
ROVA817	06:46:16	24,1189330806	34,8009198972	15,816	5,218
ROVA818	06:46:18	24,1188568167	34,8009509361	15,850	5,215
ROVA4810	08:59:22	23,9673149639	34,6098269778	11,956	29,882
ROVA4811	08:59:24	23,9673061667	34,6098234722	12,583	29,883
ROVA4812	08:59:26	23,9672964028	34,6098190417	11,727	29,884
ROVA4813	08:59:28	23,9672872861	34,6098188472	12,326	29,884
ROVA4814	08:59:30	23,9672771639	34,6098149389	12,252	29,885
ROVA4815	08:59:32	23,9672683750	34,6098126694	12,062	29,886
ROVA4816	08:59:34	23,9672551528	34,6098025500	12,207	29,887
ROVA4817	08:59:36	23,9672319583	34,6097761278	11,886	29,891
ROVA4818	08:59:38	23,9672332806	34,6097444083	11,723	29,894
ROVA4819	08:59:40	23,9672617472	34,6097216444	12,131	29,895
ROVA4820	08:59:42	23,9673058083	34,6097284167	11,841	29,892
ROVA4821	08:59:44	23,9673297472	34,6097717056	12,089	29,887
ROVA4822	08:59:46	23,9673326333	34,6098250139	12,218	29,882
ROVA4823	08:59:48	23,9673230083	34,6098716028	12,079	29,877
ROVA4824	08:59:50	23,9673184361	34,6099147222	12,139	29,873
ROVA4825	08:59:52	23,9673112111	34,6099557500	12,048	29,870
ROVA4826	08:59:54	23,9673071556	34,6099888750	11,963	29,867
ROVA4827	08:59:56	23,9672988556	34,6100161306	11,887	29,864
ROVA4828	08:59:58	23,9672943556	34,6100397083	12,012	29,862
ROVA9177	11:24:56	24,1161189583	34,8033479444	16,229	4,960
ROVA9178	11:24:58	24,1162941778	34,8032119056	16,238	4,973
ROVA9179	11:25:00	24,1164778194	34,8030696194	16,276	4,988
ROVA9180	11:25:02	24,1166677694	34,8029179889	16,205	5,004
ROVA9181	11:25:04	24,1168604639	34,8027613528	16,105	5,020
ROVA9182	11:25:06	24,1170548722	34,8026038806	16,259	5,037
ROVA9183	11:25:08	24,1172484028	34,8024437750	16,188	5,054
ROVA9184	11:25:10	24,1174401056	34,8022839111	16,084	5,071
ROVA9185	11:25:12	24,1176274889	34,8021205556	16,097	5,088
ROVA9186	11:25:14	24,1178140472	34,8019592333	16,052	5,105
ROVA9187	11:25:16	24,1180104028	34,8018052806	16,132	5,122

Πίνακας 7.9 Αποτελέσματα Κινηματικού GPS της 09 Σεπ. 2010 στο ίχνος της τροχιάς Νο 109

Στο Γράφημα 7.3 που ακολουθεί, δίνεται το γεωγραφικό πλάτος συναρτήσει του γεωγραφικού μήκους για τη διαδρομή που ακολουθήθηκε.



Γράφημα 7.3 Γεωγραφικό Πλάτος συναρτήσει Γεωγραφικού Μήκους στο Νότιο Τμήμα της τροχιάς Νο 109

7.3.Επεξεργασία μετρήσεων Παλιρροιογράφου KVR3

Στο λιμάνι του Καραβέ της Γαύδου, υπάρχουν εγκατεστημένοι τρείς παλιρροιογράφοι, για την καταγραφή των μεταβολών της στάθμης της θάλασσας (Παράγραφος 6.2.3).

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεών στη θάλασσα, λαμβάνουν χώρα μεταβολές της στάθμης της θάλασσας, οι οποίες οφείλονται κυρίως σε παλίρροιες, ρεύματα, ανέμους και άλλα τοπικά φαινόμενα.

Για τον ακριβέστερο υπολογισμό της καμπύλης που παρουσιάζει η στάθμη της θάλασσας SSH, αφαιρέθηκε από τα αποτελέσματα των μετρήσεων του GPS η επίδραση όλων αυτών των παραγόντων, ως ύψος διακύμανσης της στάθμης. Στο Γράφημα 7.4, φαίνεται η καταγραφή του παλιρροιογράφου KVR3 σε μια μεγάλη χρονική περίοδο, όπου φαίνονται οι μεγάλες διακυμάνσεις της στάθμης της θάλασσας, όπου γίνεται ιδιαίτερα φανερό ότι η μεταβολή της στάθμης της θάλασσας κατά τη διάρκεια των μετρήσεών μας, είναι μια παράμετρος που θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν.



Γράφημα 7.4 Διακύμανση της στάθμης της θάλασσας όπως καταγράφηκε από τον παλιρροιογράφο KVR3, από 16 Μαΐου 2009 έως και 02 Νοεμβρίου 2010

Ειδικότερα, στο *Γράφημα 7.5*, φαίνεται η καταγραφή του παλιρροιογράφου KVR3, μόνο για τις ημέρες των μετρήσεών. Είναι εμφανής η ημιτονοειδής μεταβολή της στάθμης της θάλασσας κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Η επίδραση αυτή της παλίρροιας και των λοιπών παραγόντων, θα αφαιρεθούν από τον τελικό υπολογισμό της στάθμης της θάλασσας.



Γράφημα 7.5 Μετρήσεις Ύψους Στάθμης της Θάλασσας στο λιμάνι του Καραβέ, από τον Παλιρροιογράφου KVR3

7.4.Υπολογισμός Ύψους Στάθμης Θάλασσας SSH

Η επόμενη φάση της επεξεργασίας μας, με δεδομένα:

- τα επεξεργασμένα δεδομένα του κινηματικού GPS
- τις μετρήσεις του παλιρροιογράφου πάνω στο σκάφος
- τις μετρήσεις του παλιρροιογράφου KVR3

είναι ο υπολογισμός της στάθμης της θάλασσας SSH.

Σύμφωνα με τη *Σχέση 7.1* και την *Εικόνα 7.6,* το ύψος στάθμης της θάλασσας SSH, μετρούμενο από ένα σημείο Ρ πάνω από αυτή, με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, θα είναι:

$$SSH = h - DH - TG_{measurement}$$
 (7.1)

όπου:

- h το ύψος του σημείου Ρ ως προς το ελλειψοειδές αναφοράς
 WGS84, όπως υπολογίστηκε από το κινηματικό GPS
- DH η διαφορά ύψους ανάμεσα στο επίπεδο αναφοράς της κεραίας του GPS και του επιπέδου λήψεως μετρήσεων του παλιρροιογράφου, όπως μετρήθηκε κατά την εγκατάσταση των οργάνων στο σκάφος.
- **TG**_{measurement} η μέτρηση του εγκατεστημένου πάνω στο σκάφος παλιρροιογράφου (Tide Gauge – TG)

Από την τιμή που προκύπτει για το SSH, αφαιρούμε τέλος και την μεταβολή της στάθμης της θάλασσας όπως καταγράφηκε από τον σταθερό παλιρροιογράφο KVR3.

Η επεξεργασία των δεδομένων όπως περιγράφηκε, μας δίνει σαν αποτέλεσμα το ύψος της στάθμης της θάλασσας πάνω από το ελλειψοειδές WGS84.



7.5 Μετατροπή SSH στο ελλειψοειδές αναφοράς του Jason-2

Εικόνα 7.6 Υπολογισμός Ύψους Στάθμης Θάλασσας SSH

Ενδεικτικοί (λόγω του μεγάλου όγκου των δεδομένων) πίνακες υπολογισμών εμφανίζονται σε επόμενη παράγραφο.

7.5.Μετατροπή SSH στο ελλειψοειδές αναφοράς του Jason-2

Όλες οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι τώρα, έχουν γίνει ως προς το ελλειψοειδές αναφοράς WGS84. Για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί το υπολογιζόμενο SSH στη μεθοδολογία βαθμονόμησης του δορυφόρου Jason-2, αλλά και για να το συγκριθεί με το ύψος του τοπικού μοντέλου του γεωειδούς, πρέπει να ορίζονται και τα δύο (SSH και N) ως προς το ίδιο ελλειψοειδές αναφοράς. Επειδή όμως ο δορυφόρος Jason-2 δεν χρησιμοποιεί το ελλειψοειδές WGS84 αλλά ένα άλλο ελλειψοειδές αναφοράς, πρέπει να μετατρέψουμε τις συντεταγμένες και το SSH που υπολογίστηκε στο σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιεί και ο δορυφόρος Jason, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους περιγραφής των δύο ελλειψοειδών, όπως φαίνονται στον Πίνακα 7.10.

Παράμετροι Ελλειψοειδών WGS84 και Ελλειψοειδούς Jason-2					
	a (μεγάλος ημιάξονας ελλειψοειδούς) Semimajor (Km)	b (μικρός ημιάξονας ελλειψοειδούς) Semiminor (Km)	f συντελεστής εκκεντρότητας flattening coefficient	e Eccentricity	
WGS84	6.378.137,0	6.356.752,314245	1 / 298,257223563 3.352810664775694e-003	8.181919084296517e-002	
Jason-2	6.378.136,3	6.356.751,6005	1 / 298.257 3.352813177896914e-003	8.181922145552321e-002	

Πίνακας 7.10 Παράμετροι ελλειψοειδών WGS84 και ελλειψοειδούς τροχιάς Jason-2

7.6.Πραγματοποίηση υπολογισμών

Μετά τον υπολογισμό του ύψους στάθμης της θάλασσας SSH ως προς το ελλειψοειδές αναφοράς WGS84, όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 7.4, και χρησιμοποιώντας την περιγραφή των ελλειψοειδών αναφοράς από τον Πίνακα 7.10, υπολογίζεται το SSH ως προς το ελλειψοειδές αναφοράς Jason-2.

Για την περιοχή της Γαύδου (Περιοχή Νότια της Κρήτης), έχει αναπτυχθεί από το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, ένα τοπικό μοντέλο γεωειδούς. Για τις θέσεις λήψεως μετρήσεων στη θάλασσα, υπολογίστηκαν οι τιμές του ύψους του μοντέλου αυτού του γεωειδούς Ν ως προς το ελλειψοειδές αναφοράς του δορυφόρου Jason-2.

Στους Πίνακες που ακολουθούν, παρουσιάζονται μόνο ενδεικτικά (λόγω μεγάλου όγκου δεδομένων), τμήματα της επεξεργασίας των μετρήσεων, για παρατήρηση της μεθοδολογίας.

Κατά την διαδικασία επεξεργασίας των μετρήσεων, παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα:

- οι μετρήσεις του GPS από το Ροδάκινο έως τη Γαύδο της 18 Σεπτεμβρίου 2009, εμφανίστηκαν πολύ θορυβώδεις, αντίθετα με τις μετρήσεις από τη Γαύδο στο Ροδάκινο που ήταν σε επιτρεπτά επίπεδα. Η αιτία ήταν οι κακές καιρικές συνθηκών που επικράτησαν στην περιοχή, αλλά και η εσπευσμένη ταχύτατη επιστροφή στο λιμάνι του Καραβέ της Γαύδου, που έδωσαν και μη αποδεκτές και λίγες μετρήσεις, λόγω μικρού χρόνου λήψης μετρήσεων στη θάλασσα. Έτσι οι μετρήσεις αυτές απορρίφτηκαν, και στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι μετρήσεις από τον Καραβέ της Γαύδου έως το Ροδάκινο της Κρήτης.
- Κατά τη δεύτερη περίοδο μετρήσεων την 27 Αυγούστου 2010, οι καιρικές συνθήκες ήταν καλές, και οι μετρήσεις που ελήφθησαν αξιόπιστες, οπότε χρησιμοποιήθηκαν όλες στους υπολογισμούς μας.
- Η τρίτη περίοδος μετρήσεων, πραγματοποιήθηκε επίσης με καλές καιρικές συνθήκες, και έδωσε καλές ποιοτικά μετρήσεις. Όμως, επειδή οι διαδρομές που καταγράφηκαν στη θάλασσα ήταν δύο, μια της αναχώρησης από τη Γαύδο και μια της επιστροφής, σε μια συνεχόμενη καταγραφή, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία αρχικά ολόκληρης της διαδρομής, και μετά τμηματικά, χωρίζοντάς την σε δύο τμήματα. Τμήμα Α το τμήμα μετρήσεων από τη Γαύδο έως 25Km νοτιοδυτικά της, και το Τμήμα Β όπου περιλαμβάνονται οι μετρήσεις της επιστροφής. Αυτό έγινε διότι για το ίδιο γεωγραφικό πλάτος (φ) είχαμε δύο τιμές ύψους του γεωειδούς, αφού άλλαζε το γεωγραφικό μήκος (λ) λόγω των διαφορετικών διαδρομών. Έτσι, για καλύτερη σύγκριση του SSH με το μοντέλο του γεωειδούς, έγινε και ξεχωριστή επεξεργασία για τα δύο τμήματα μετρήσεων.

7.6 Πραγματοποίηση υπολογισμών

Name	Baseline Length (Km)	SSH (WGS-84) (m)	SSH (Jason) (m)	N (m)	SSH – N (m)	SSH-N (corrected)
ROVER1	1,505	16,565	17,2690	16,8350	0,434	0,426
ROVER2	1,512	16,241	16,9450	16,8360	0,109	0,101
ROVER3	1,519	16,161	16,8650	16,8369	0,028	0,020
ROVER4	1,525	16,128	16,8320	16,8380	-0,006	-0,014
ROVER5	1,531	16,160	16,8640	16,8380	0,026	0,018
ROVER6	1,537	16,149	16,8530	16,8390	0,014	0,006
ROVER7	1,543	16,293	16,9970	16,8390	0,158	0,150
ROVER8	1,549	16,044	16,7479	16,8401	-0,092	-0,100
ROVER9	1,555	16,257	16,9609	16,8411	0,120	0,112
ROVER10	1,562	16,364	17,0679	16,8411	0,227	0,219
ROVER3606	41,849	20,756	21,4601	21,4401	0,020	0,012
ROVER3607	41,848	20,756	21,4601	21,4401	0,020	0,012
ROVER3608	41,848	20,816	21,5201	21,4401	0,080	0,072
ROVER3609	41,848	20,818	21,5221	21,4401	0,082	0,074
ROVER3610	41,849	20,871	21,5751	21,4401	0,135	0,127
ROVER3611	41,850	20,877	21,5811	21,4411	0,140	0,132
ROVER3612	41,852	20,821	21,5251	21,4411	0,084	0,076
ROVER3613	41,854	20,768	21,4721	21,4411	0,031	0,023
ROVER3614	41,857	20,833	21,5371	21,4421	0,095	0,087
ROVER3615	41,859	20,817	21,5211	21,4421	0,079	0,071
ROVER3616	41,860	20,792	21,4961	21,4422	0,054	0,046
ROVER3617	41,860	20,754	21,4581	21,4422	0,016	0,008
ROVER3618	41,858	20,725	21,4292	21,4412	-0,012	-0,020
ROVER3619	41,854	20,764	21,4682	21,4401	0,028	0,020
ROVER3620	41,848	20,725	21,4292	21,4391	-0,010	-0,018
ROVER3621	41,842	20,658	21,3622	21,4370	-0,075	-0,082
ROVER3622	41,837	20,712	21,4162	21,4360	-0,020	-0,027
ROVER4690	0,015	16,114	16,8178	16,6970	0,121	0,113
ROVER4691	0,015	16,155	16,8588	16,6970	0,162	0,154
ROVER4692	0,015	16,108	16,8118	16,6970	0,115	0,107
ROVER4693	0,015	16,131	16,8348	16,6970	0,138	0,130
ROVER4694	0,015	16,128	16,8318	16,6970	0,135	0,127
ROVER4695	0,015	16,086	16,7898	16,6970	0,093	0,085
ROVER4696	0,015	16,080	16,7838	16,6970	0,087	0,079
ROVER4697	0,015	16,079	16,7828	16,6970	0,086	0,078
ROVER4698	0,015	16,063	16,7668	16,6970	0,070	0,062
ROVER4699	0,015	16,064	16,7678	16,6970	0,071	0,063
ROVER4700	0,016	16,130	16,8338	16,6970	0,137	0,129
ROVER4701	0,016	16,089	16,7928	16,6970	0,096	0,088
ROVER4702	0,016	16,075	16,7788	16,6970	0,082	0,074
ROVER4703	0,016	16,098	16,8019	16,6970	0,105	0,097
ROVER4704	0,016	16,101	16,8049	16,6970	0,108	0,100
ROVER4705	0,016	16,095	16,7989	16,6970	0,102	0,094
ROVER4706	0,016	16,127	16,8309	16,6970	0,134	0,126
ROVER4707	0,016	16,069	16,7729	16,6970	0,076	0,068
ROVER4708	0,016	16,097	16,8009	16,6970	0,104	0,096

Πίνακας 7.11 Υπολογισμός SSH-N για το Βορειοανατολικό τμήμα της τροχιάς No 109

7.6 Πραγματοποίηση υπολογισμών

Name	Baseline Length (Km)	SSH (WGS84) (m)	SSH (Jason) (m)	N (m)	SSH – N (m)	SSH-N (corrected)
ROVR1	0,124	16,150	16,854	16,6926	0,1616	0,1603
ROVR2	0,124	16,185	16,889	16,6926	0,1966	0,1953
ROVR3	0,124	16,102	16,806	16,6926	0,1136	0,1123
ROVR4	0,124	16,132	16,836	16,6926	0,1436	0,1423
ROVR5	0,124	16,117	16,821	16,6926	0,1286	0,1273
ROVR6	0,124	16,207	16,911	16,6926	0,2186	0,2173
ROVR7	0,124	16,198	16,902	16,6926	0,2096	0,2083
ROVR8	0,124	16,184	16,888	16,6926	0,1956	0,1943
ROVR9	0,125	16,203	16,907	16,6926	0,2146	0,2133
ROVR10	0,125	16,156	16,860	16,6926	0,1676	0,1663
ROVR11	0,125	16,152	16,856	16,6926	0,1636	0,1623
ROVR12	0,125	16,165	16,869	16,6926	0,1766	0,1753
ROVR13	0,125	16,119	16,823	16,6926	0,1306	0,1293
ROVR14	0,125	16,186	16,890	16,6926	0,1976	0,1963
ROVR15	0,126	16,207	16,911	16,6926	0,2186	0,2173
ROVR16	0,126	16,127	16,831	16,6926	0,1386	0,1373
ROVR17	0,126	16,101	16,805	16,6926	0,1126	0,1113
ROVR18	0,126	16,076	16,780	16,6926	0,0876	0,0863
ROVR19	0,126	16,076	16,780	16,6926	0,0875	0,0863
ROVR20	0,126	16,096	16,800	16,6926	0,1075	0,1063
ROVR4362	24,287	12,189	12,893	12,7027	0,1902	0,1890
ROVR4363	24,289	12,464	13,168	12,7027	0,4652	0,4640
ROVR4364	24,291	11,384	12,088	12,7027	-0,6148	-0,6160
ROVR4365	24,291	12,415	13,119	12,7017	0,4172	0,4159
ROVR4366	24,293	12,029	12,733	12,7017	0,0312	0,0299
ROVR4367	24,295	11,697	12,401	12,7017	-0,3008	-0,3021
ROVR4368	24,296	12,406	13,110	12,7017	0,4082	0,4069
ROVR4369	24,297	12,404	13,108	12,7017	0,4062	0,4049
ROVR4370	24,299	11,708	12,412	12,7007	-0,2888	-0,2901
ROVR4371	24,300	13,147	13,851	12,7007	1,1502	1,1489
ROVR4372	24,303	12,175	12,879	12,7007	0,1782	0,1769
ROVR4373	24,304	12,122	12,826	12,7007	0,1252	0,1239
ROVR4374	24,305	12,265	12,969	12,6997	0,2692	0,2679
ROVR4375	24,307	12,199	12,903	12,6997	0,2032	0,2019
ROVR4376	24,308	12,171	12,875	12,6997	0,1752	0,1739
ROVR4377	24,310	12,443	13,147	12,6997	0,4472	0,4459
ROVR4378	24,311	12,242	12,946	12,6987	0,2472	0,2459
ROVR4379	24,313	12,088	12,792	12,6987	0,0932	0,0919
ROVR4380	24,314	11,908	12,612	12,6987	-0,0868	-0,0881
ROVR4381	24,315	11,873	12,577	12,6987	-0,1218	-0,1231
ROVR4382	24,317	12,607	13,311	12,6987	0,6122	0,6109

Πίνακας 7.12 Υπολογισμός SSH-N για το Νοτιοανατολικό τμήμα της τροχιάς No 018

7.6 Πραγματοποίηση υπολογισμών

Name	Proc. Length (Km)	SSH (WGS84) (m)	SSH (Jason) (m)	N (m)	SSH – N (m)	SSH - N (corrected)
ROVA804	5,27	15,289	15,993	16,0452	-0,0523	-0,002
ROVA805	5.26	15.319	16.023	16.0463	-0.0234	0.027
ROVA806	5.26	15.198	15.902	16.0462	-0.1444	-0.094
ROVA807	5,26	15,199	15,903	16,0472	-0,1444	-0,094
ROVA808	5.25	15.262	15.966	16.0472	-0.0814	-0.031
ROVA809	5.25	15.374	16.078	16.0482	0.0296	0.080
ROVA810	5.24	15.318	16.022	16.0483	-0.0265	0.024
ROVA811	5.24	15,260	15,964	16.0482	-0.0844	-0.034
ROVA812	5,24	15,200	16.015	16.0492	-0.0344	0.016
ROVA813	5,23	15,199	15,903	16.0492	-0.1464	-0.096
ROVA814	5.23	15,299	16.003	16.0502	-0.0474	0.003
ROVA815	5.22	15,207	15,911	16.0503	-0.1395	-0.089
ROVA4810	29.88	11,196	11,900	12,1602	-0.2606	-0.210
ROVA4811	29.88	11.808	12,512	12,1602	0.3514	0.402
ROVA4812	29.88	10.947	11.651	12.1602	-0.5096	-0.459
ROVA4813	29.88	11.555	12.259	12.1602	0.0984	0.149
ROVA4814	29.88	11.485	12.189	12.1602	0.0284	0.079
ROVA4815	29.89	11.308	12.012	12.1602	-0.1486	-0.098
ROVA4816	29.89	11.497	12.201	12.1602	0.0404	0.091
ROVA4817	29.89	11.172	11.876	12.1592	-0.2835	-0.233
ROVA4818	29.89	10.985	11.689	12.1592	-0.4705	-0.420
ROVA4819	29.89	11.389	12.093	12.1592	-0.0665	-0.016
ROVA4820	29.89	11.083	11.787	12.1592	-0.3725	-0.322
ROVA4821	29.89	11.319	12.023	12.1602	-0.1375	-0.087
ROVA4822	29.88	11.435	12.139	12.1602	-0.0215	0.029
ROVA4823	29,88	11,293	11,997	12,1612	-0,1645	-0,114
ROVA4824	29,87	11,397	12,101	12,1622	-0,0615	-0,011
ROVA4825	29,87	11,433	12,137	12,1622	-0,0255	0,025
ROVA4826	29,87	11,428	12,132	12,1632	-0,0315	0,019
ROVA4827	29,86	11,389	12,093	12,1632	-0,0705	-0,020
ROVA9172	4,91	15,410	16,114	16,0917	0,0228	0,073
ROVA9173	4,92	15,481	16,185	16,0907	0,0948	0,145
ROVA9174	4,93	15,618	16,322	16,0897	0,2328	0,283
ROVA9175	4,94	15,467	16,171	16,0886	0,0829	0,133
ROVA9176	4,95	15,561	16,265	16,0875	0,1780	0,229
ROVA9177	4,96	15,650	16,354	16,0856	0,2679	0,318
ROVA9178	4,97	15,651	16,355	16,0835	0,2710	0,322
ROVA9179	4,99	15,687	16,391	16,0815	0,3090	0,360
ROVA9180	5,00	15,631	16,335	16,0795	0,2550	0,306
ROVA9181	5,02	15,548	16,252	16,0774	0,1741	0,225
ROVA9182	5,04	15,723	16,427	16,0754	0,3511	0,402
ROVA9183	5,05	15,661	16,365	16,0724	0,2922	0,343
ROVA9184	5,07	15,572	16,276	16,0703	0,2053	0,256
ROVA9185	5,09	15,623	16,327	16,0683	0,2583	0,309
ROVA9186	5,11	15,595	16,299	16,0664	0,2322	0,283
ROVA9187	5,12	15,650	16,354	16,0633	0,2903	0,341

Πίνακας 7.13 Υπολογισμός SSH-N για το Νοτιοδυτικό τμήμα της τροχιάς No 109

7.7.Δημιουργία Γραφημάτων SSH, N, και SSH-N

Μετά τον υπολογισμό των τελικών συντεταγμένων των μετρήσεων του GPS στο σύστημα αναφοράς της τροχιάς του Jason-2 και του τελικού ύψους της στάθμης της θάλασσας που υπολογίστηκε και αυτό ως προς το ίδιο ελλειψοειδές, μπορούμε να τα παραστήσουμε γραφικά για να προβούμε σε συγκρίσεις των τάσεών τους.

Μια πρώτη εκτίμηση της μεταβολής της στάθμης της θάλασσας μπορούμε να δούμε από το διάγραμμα του SSH συναρτήσει της απόστασής από τον εκάστοτε σταθμό βάσης.

Ακολουθεί το διάγραμμα του γεωγραφικού πλάτους (φ) συναρτήσει του SSH, αλλά και των τιμών του τοπικού μοντέλου του γεωειδούς Ν, όπως επίσης και της διαφοράς των τιμών SSH – Ν, όπου εμφανίζεται η διαφορά του μοντέλου του γεωειδούς από το ύψος στάθμης που υπολογίστηκε, για κάθε μέτρηση που λήφθηκε στη θάλασσα.

Για να έχουμε καλύτερη ακόμη εικόνα της τάσης των δύο καμπυλών, χρησιμοποιήθηκε ένα πολυώνυμο παραγόμενο από τις τιμές του SSH που υπολογίστηκαν, την γραφική παράσταση του οποίου βλέπουμε σε ξεχωριστό διάγραμμα.

Έτσι, για κάθε περίοδο μετρήσεων δίνονται τρία γραφήματα:

- Απόσταση από το Σταθμό Αναφοράς συναρτήσει του SSH
- Γεωγραφικό πλάτος φ συναρτήσει του SSH του N και της διαφοράς
 τους SSH-N, με ταυτόχρονη παρουσίαση την καταγραφής της
 παλίρροιας από τον παλιρροιογράφο KVR3. Επίσης, εμφανίζονται και
 τα στατιστικά της διαφοράς SSH-N.
- Γεωγραφικό πλάτος φ συναρτήσει των τιμών του SSH που προκύπτουν από το πολυώνυμο προσέγγισης του υπολογιζόμενου SSH, του N και της νέας διαφοράς τους SSH-N

τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια.



Γράφημα 7.6 Απόσταση από το σταθμό αναφοράς συναρτήσει του SSH για το Βόρειο τμήμα της τροχιάς Νο 109



Γράφημα 7.7 Γεωγραφικό Πλάτος φ συναρτήσει των (SSH & N & SSH-N) για το Βόρειο τμήμα της τροχιάς Νο 109



Γράφημα 7.8 Γεωγραφικό Πλάτος φ συναρτήσει των (πολυώνυμο SSH & N & SSH-N) για το Βόρειο τμήμα της τροχιάς No 109



Γράφημα 7.9 Απόσταση από το σταθμό αναφοράς συναρτήσει του SSH για το Νότιο τμήμα της τροχιάς Νο 018







Γράφημα 7.11 Γεωγραφικό Πλάτος φ συναρτήσει των (πολυώνυμο SSH & N & SSH-N) για το Νότιο τμήμα της τροχιάς No 018



Γράφημα 7.12 Απόσταση από το σταθμό αναφοράς συναρτήσει του SSH για το Νότιο τμήμα της τροχιάς Νο 109



Γράφημα 7.13 Γεωγραφικό Πλάτος φ συναρτήσει των (SSH & N & SSH-N) για το Νότιο τμήμα της τροχιάς Νο 109



Γράφημα 7.14 Γεωγραφικό Πλάτος φ συναρτήσει των (πολυώνυμο SSH & N & SSH-N) για το Νότιο τμήμα της τροχιάς Νο 109



Γράφημα 7.15 Γεωγραφικό Πλάτος φ συναρτήσει των (SSH & N & SSH-N) για το Νότιο τμήμα της τροχιάς Νο 109, από Γαύδο έως 25Km Νοτιοδυτικά







Γράφημα 7.17 Γεωγραφικό Πλάτος φ συναρτήσει των (SSH & N & SSH-N) για το Νότιο τμήμα της τροχιάς Νο 109, από 25Km Νοτιοδυτικά έως Γαύδο



Γράφημα 7.18 Γεωγραφικό Πλάτος φ συναρτήσει των (πολυώνυμο SSH & N & SSH-N) για το Νότιο τμήμα της τροχιάς Νο 109, από 25Km Νοτιοδυτικά έως Γαύδο

7.8.Σύγκριση καμπύλης SSH με καμπύλη τοπικού μοντέλου γεωειδούς

Από τη σύγκριση των καμπυλών της υπολογιζόμενης στάθμης της θάλασσας SSH, και του ύψους του τοπικού μοντέλου του γεωειδούς στη περιοχή, παρατηρούμε τα εξής:

- Γενικά, οι καμπύλες παρουσιάζουν την ίδια περίπου τάση (trend)
- Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάζονται συνήθως κοντά στις ακτές, είτε της Κρήτης είτε της Γαύδου.
- Χωρίς να λάβουμε υπ' όψιν την απόλυτη τιμή του SSH, η κλίση της καμπύλης του και οι μεταβολές της, υποδηλώνουν, έστω μικρές αλλά αξιοσημείωτες διαφορές του μοντέλου του γεωειδούς από τη στάθμη της θάλασσας.
- Κατά την μελέτη των γραφημάτων, θα πρέπει πάντα να ληφθεί υπ' όψιν, το γεγονός πιθανών ανωμαλιών ή σφαλμάτων στη λήψη μετρήσεων από το GPS, το οποίο είναι και το κύριο εργαλείο στην παρούσα έρευνα μέτρησης της στάθμης της θάλασσας. Τέτοια φαινόμενα λαμβάνουν χώρα χαρακτηριστικά στο τμήμα μεταξύ γεωγραφικού πλάτους φ=35,10° και φ=35,13° (Γράφημα 7.7) όπου παρατηρούμε μια απότομη πτώση της υπολογιζόμενης στάθμης της θάλασσας. Τέτοια φαινόμενα θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στην επεξεργασία των μετρήσεων του GPS, που τελικά θα επηρεάσει την αξιολόγηση του μοντέλου του γεωειδούς.

7.9.Στατιστική Επεξεργασία

Από τη στατιστική επεξεργασία των διαφορών του SSH από το ύψος του τοπικού μοντέλου του γεωειδούς Ν, φαίνονται στον Πίνακα 7.14, και γραφικά στο Γράφημα 7.19.

Surveys		Στατιστικά SSH - N (m)					
	max	min	mean	std	rms		
Survey 1 - Βόρειο Τμήμα Τροχιάς 109	Survey 1	0,720	-0,378	0,008	0,118	0,118	
Survey 2 - Νότιο Τμήμα Τροχιάς 018	Survey 2	1,150	-1,069	0,001	0,257	0,257	
Survey 3 (Full Data) - Νότιο Τμήμα Τροχιάς 109	Survey 3	0,716	-0,754	-0,051	0,173	0,180	
Survey 3 Part Α - Νότιο Τμήμα Τροχιάς 109 (εκκίνηση Γαύδο με κατεύθυνση Νότια)	Survey 3A	0,716	-0,754	-0,044	0,184	0,189	
Survey 3 Part B - Νότιο Τμήμα Τροχιάς 109 (από το Νοτιότερο σημείο έως τη Γαύδο)	Survey 3B	0,571	-0,673	-0,064	0,176	0,187	

Πίνακας 7.14 Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων SSH-N





Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας του SSH-N, διαφαίνονται τα εξής συμπεράσματα:

- Εξετάζοντας τις μέσες τιμές της διαφοράς SSH-N, διαπιστώνουμε ότι για τις δύο πρώτες περιόδους μετρήσεων, η απόκλιση είναι σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα της τάξης του ενός (1mm) έως οκτώ (8mm) χιλιοστών. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο με την τρίτη περίοδο των μετρήσεων, όπου οι διαφορές των μέσων τιμών των διαφορών κυμαίνονται από 4,4cm ως και 6,4cm.
- Η διακύμανση της απόκλισης μεταβάλλεται μέσα σε ένα μεγάλο εύρος ανάμεσα στις τρείς περιόδους μετρήσεων
 - 1,10m στην πρώτη
 - 2,22m στην δεύτερη
 - 1,47m στην τρίτη

και μάλιστα ανεξάρτητα από τη διακύμανση της μέσης τιμής. Για παράδειγμα, στη δεύτερη περίοδο μετρήσεων, ενώ η μέση τιμή της απόκλισης αγγίζει το εξαιρετικό 1mm, σε αυτή την περίοδο μετρήσεων έχουμε και το μεγαλύτερο εύρος διακύμανσης της διαφοράς SSH-N.

 Το ίδιο φαινόμενο, αποτυπώνεται και στην τυπική απόκλιση, όπου η μέγιστη τυπική απόκλιση εμφανίζεται στην περίοδο μετρήσεων με τη μικρότερη διακύμανση μέσης τιμής, τη δεύτερη.

Κεφάλαιο 8. Συμπεράσματα - Προτάσεις

8.1.Συμπεράσματα

Με το πέρας της επεξεργασίας, έγινε προφανές ότι γενικά το SSH ακολουθεί την ίδια τάση με το Ύψος του Γεωειδούς Ν, όχι τόσο από πλευράς απόλυτων τιμών, όσο από πλευράς κλίσης των καμπυλών τους.

Πάραυτα, διαπιστώνονται αποκλίσεις, οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε διάφορους παράγοντες, όπως:

- <u>Παλίρροιες</u>: Κατά την πραγματοποίηση των υπολογισμών, λήφθηκαν υπ' όψιν και οι μετρήσεις του παλιρροιογράφου KVR3, οι οποίες αφαιρέθηκαν από τον τελικό υπολογισμό του SSH. Όμως, αυτές οι παλίρροιες που καταγράφηκαν και λήφθηκαν υπόψη, λάμβαναν χώρα στο λιμάνι του Καραβέ της Γαύδου, ενώ δεν είναι γνωστή και δεν έχει ληφθεί υπ' όψιν η επίδρασή τους στα σημεία λήψης μετρήσεων που απείχαν ακόμη και τριάντα χιλιόμετρα από το λιμάνι
- <u>Ρεύματα</u>: Κατά τη διάρκεια λήψης μετρήσεων στη θάλασσα, είναι πολύ πιθανόν να είχε επηρεαστεί η στάθμη της θάλασσας από τη δραστηριότητα θαλάσσιων ρευμάτων. Αυτά δεν ελήφθησαν υπ' όψιν στην επεξεργασία, και ενδέχεται να παίζουν σημαντικό ρόλο, ειδικά σε μια περιοχή που δρουν συνήθως έντονα θαλάσσια ρεύματα, όπως η περιοχή της Γαύδου στο Λιβυκό Πέλαγος.
- <u>Άνεμοι</u>: Οι άνεμοι δημιουργούν κατά τόπους μεταβολή της στάθμης της θάλασσας, ανάλογη με την ισχύ τους. Κατά τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στη θάλασσα, πολλές φορές η έντασή τους ξεπερνούσε τα 5 beaufort, που δεν ενδείκνυται για μετρήσεις της στάθμης της θάλασσας, αλλά στην περιοχή είναι σύνηθες τέτοιες καιρικές συνθήκες, και όσο και αν έγινε προσπάθεια να αποφευχθούν, ήταν τέτοια η ταχύτητα εναλλαγής των συνθηκών και

η συχνότητα εμφάνισής τους, που στάθηκε πρακτικά αδύνατη η οργάνωση μετρήσεων στη θάλασσα σε κατάσταση νηνεμίας.

 Σφάλματα Παλιρροιογράφου: Αν και από τις μετρήσεις που λήφθηκαν από τον παλιρροιογράφο που ήταν εγκατεστημένος πάνω στο σκάφος κάθε φορά, αφαιρέθηκαν οι τιμές εκτός ορίων, πάλι ενδέχεται οι μετρήσεις να εμπεριέχουν σφάλματα, τα οποία, με δεδομένο το γεγονός ότι ο παλιρροιογράφος ήταν τύπου radar, και οι καιρικές συνθήκες όχι οι βέλτιστες και επιθυμητές, οδηγούν σε λανθασμένες μετρήσεις της απόστασης από τη θάλασσα, λόγω του κυματισμού. Και αυτά τα σφάλματα ενδέχεται να επηρέασαν την ακρίβεια υπολογισμού του SSH.
8.2.Προτάσεις

Έχοντας εντοπίσει τους παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τους υπολογισμούς του SSH, αλλά και παράγοντες που μετά από τη μελέτη της περιοχής εμφανίζονται να παίζουν σημαντικό ρόλο, μια επέκταση της συγκεκριμένης εργασίας θα μπορούσε να περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

Από την πλευρά της ακρίβειας υπολογισμού του ύψους στάθμης της θάλασσας:

- Μελέτη των παλιρροιών και των ρευμάτων στην περιοχή της Γαύδου και ενσωμάτωσή τους στον υπολογισμό του SSH.
- Χρήση δεύτερου παλιρροιογράφου πάνω στο σκάφος για εξάλειψη των σφαλμάτων παλιρροιογράφου ή βελτίωση της ακρίβειας της μετρούμενης απόστασης από την επιφάνεια της θάλασσας.
- Χρήση μεγαλύτερου σκάφους, ώστε να μην επηρεάζεται τόσο από τον κυματισμό, για την επίτευξη ακριβέστερων μετρήσεων.
- Περαιτέρω επεξεργασία των μετρήσεων του GPS που λήφθηκαν στη θάλασσα, για τον υπολογισμό παραμέτρων που επηρεάζουν την ακρίβειά του όπως το υγρό στοιχείο της τροπόσφαιρας (wet tropospheric corrections) που είναι ιδιαίτερα έντονο στην περιοχή.

Από την πλευρά της ακρίβειας του τοπικού μοντέλου του γεωειδούς:

Χαρακτηριστικό της περιοχής ενδιαφέροντος, δηλαδή της θαλάσσιας περιοχής της Νήσου Γαύδου, είναι το έντονο ανάγλυφο του πυθμένα της θάλασσας. Σύμφωνα με το βαθυμετρικό χάρτη της περιοχής, όπως τον έχουμε δει στην Εικόνα 3.7, κινούμενοι Νότια της Γαύδου τριάντα χιλιόμετρα, το βάθος της θάλασσας μεταβάλλεται ακόμη και κατά 3.000m. Νότια της Γαύδου, υπάρχει η τάφρος ανάμεσα στην Ευρασιατική και Αφρικανική τεκτονική πλάκα. Έχουμε έτσι ένα μεγάλο τμήμα του φλοιού της Γης που αποτελείται από νερό αντί από πετρώματα. Όπως έχει προαναφερθεί, το μοντέλο του

γεωειδούς είναι μια ισοδυναμική επιφάνεια στην οποία το πεδίο βαρύτητας της Γης είναι σταθερό. Όταν όμως έχουμε απότομη μεταβολή του υλικού που προκαλεί τη βαρύτητα (από πετρώματα σε νερό και αντίστροφα), αυτή θα πρέπει να αντικατοπτρίζεται και στο μοντέλο του γεωειδούς (Εικόνα 8.1). Έτσι, στον προσδιορισμό του μοντέλου του γεωειδούς, θα πρέπει να έχει ληφθεί υπόψη σε μεγάλο βαθμό η εναλλαγή της πυκνότητας από πέτρωμα σε νερό και αντίστροφα, ώστε να ακολουθεί ακριβέστερα τη μεταβολή των βαρυτικών δυνάμεων, και ειδικά σε αυτήν την περιοχή που το μοντέλο του γεωειδούς είναι απαραίτητο για την επίτευξη βαθμονόμησης δορυφόρων αλτιμετρίας.



Εικόνα 8.1 Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου επίδρασης της βαθυμετρίας στο μοντέλο του γεωειδούς

<u>Βιβλιογραφία</u>

- American Society of Civil Engineers. <u>Journal of Surveying Engineering</u>. ASCE Publications, Feb. 2004.
- Ashtech. <u>GNSS Solutions Software</u>. 2010. <http://www.ashtech.com/landsurveying/gnss-solutions-3935.kjsp?RH=PRUEGNSSTECHNOLOGY>.
- Astronomical Institute, University of Berne. <u>Bernese GPS Software Ver. 5.0</u>. Dec. 2010. http://www.bernese.unibe.ch/>.
- CNES, LEGOS, CLS. <u>Regional MSL treads from Oct-1992 to Mar-2010 (mm/year)</u>. 2010.
- CNES. OSTST/Jason-2 Product Handbook. 2009.
- CNES, CNES Home. 2010 <http://www.cnes.fr/web/CNES-en/7114-home-cnes.php>
- CNES, CLS. Coastal Applications: Aviso. 2010.
- <http://www.aviso.oceanobs.com/en/applications/coastalapplications/index.html>.
- CNES, CLS. <u>Public Release of the Jason-2 Geophysical Data Records</u>. 05 08 2009. http://www.aviso.oceanobs.com/en/news-storage/news-detail/index.html?tx_ttnews%5Btt_news%5D=562&tx_ttnews%5BbackPid%5D=285&cHash=c7c571f718.
- Department of Earth Atmospheric and Planetary Sciences, MIT. <u>GAMIT-GLOBK</u>. Sep. 2010. http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/.
- ESA, CNES. «Radar Altimetry Tutorial.» 09 04 2009. <u>Radar Altimetry Tutorial.</u> < http://www.altimetry.info/documents/Radar_Altimetry_Tutorial_20090406. pdf>.

Géographique National France. <u>ITRF2005</u>. September 2010.

<http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/ITRF2005.php>.

Giel, Bill. <u>GNSS Calendar</u>. 15 Μάρτιος 2010.

<http://www.rvdi.com/freebies/gpscalendar.html>.

Herring, T.A., R.W. King, and S.C. McClusky. <u>GAMIT Reference Manual, Release 10.3</u>. 2009.

- Mertikas, Prof. Stylianos. <u>Calibration of satellite radar altimeters at Gavdos Cal/Val</u> <u>facility using three different methodologies</u>. Chania: Geodesy and Geomatics Engineering Lab, Technical University of Crete, 2009.
- Mertikas, Prof. Stylianos. <u>GPS Processing Results</u>. Chania: Geodesy and Geomatics Engineering Lab, Technical University of Crete, 2009.
- Mertikas, Prof. Stylianos. <u>Sea Surface Height Determination Using Kinematic GPS</u>. Chania: Geodesy and Geomatics Engineering Lab, Technical University of Crete, 2009.
- NASA, JPL. <u>A Growing La Niña Chills Out the Pacific</u>. 2010. < http://www.jpl.nasa.gov/news/news.cfm?release=2010-300 >.
- NASA, JPL (Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology). <u>The</u> <u>International GNSS Service (IGS)</u>, November 2010. .
- NASA, JPL. <u>QOCA</u>. Aug. 1998. <http://gipsy.jpl.nasa.gov/qoca/>.
- NASA, JPL. <u>FTP directory /pub/product/1549/ at igscb.jpl.nasa.gov</u>. 2010. <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/product/1549/>.
- NASA, JPL. <u>FTP directory /pub/product/1598/ at igscb.jpl.nasa.gov</u>. 2010. <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/product/1598/>.
- NASA, JPL. <u>FTP directory /pub/product/1600/ at igscb.jpl.nasa.gov</u>. 2010. <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/product/1600/>.

NOAA. El Nino. 19 April 2010. < http://www.elnino.noaa.gov/edu.html>.

NOAA. La Nina Page. 2010. <http://www.elnino.noaa.gov/lanina.html>.

Royal Observatory of Belgium. <u>EUREF</u>. Dec. 2010. <http://www.euref.eu/>.

- Technical University of Crete. <u>Laboratory of Geodesy and Geomatics Engineering -</u> <u>GeoMatLab</u>. 2009. <http://www.geomatlab.tuc.gr/>.
- The MathWorks, Inc. <u>MATLAB The Language Of Technical Computing</u>. 2010. http://www.mathworks.com/products/matlab/index.html?ref=pfomain.
- Μερτίκας, Στυλιανός Π. <u>Εισαγωγή στη Γεωδαισία και τον Δορυφορικό Εντοπισμό</u>. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, 2009.